

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Konstrukce a odzkoušení přípravku pro
měření teplotní roztažnosti plastů**

2007

Roman Balda

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program M2301-strojní inženýrství

Strojírenská technologie
Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Konstrukce a odzkoušení přípravku pro měření teplotní roztažnosti plastů

Construction and testing a jig for thermal expansion measurement of plastics

Roman Balda
KSP-TP-785

Vedoucí diplomové práce:
Konzultant diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld - *TU v Liberci*
ing.Luboš Běhálek - *TU v Liberci*

Rozsah práce a příloh:

Počet stran	62
Počet tabulek	15
Počet obrázků	50
Počet grafů	16
Počet příloh	4

Datum : 25.5.2007

A N O T A C E
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program	M2301- Strojní inženýrství
Diplomant:	Roman Balda
Téma práce:	Konstrukce a odzkoušení přípravku pro měření teplotní roztažnosti plastů Construction and testing a jig for thermal expansion measurement of plastics
Číslo DP:	KSP-TP-785
Vedoucí DP	doc. Dr. Ing. Petr Lenfeld – <i>TU v Liberci</i>
Konzultant:	Ing. Luboš Běhálek - <i>TU v Liberci</i>

Abstrakt:

Cílem diplomové práce je zkonstruování přípravku pro měření teplotní roztažnosti plastů a jeho odzkoušení, které ověří správnost konstrukčního a funkčního řešení.

Teoretická část obsahuje popis a rozbor základních druhů plastů, jejich struktury a základních vlastností, které mají na teplotní roztažnost vliv.

V experimentální části je popsán výběr měřících elementů a zařízení, který spolu s navrženým přípravkem tvoří měřící sestavu pro měření a vyhodnocení koeficientu délkové teplotní roztažnosti plastů.

V závěru práce je odzkoušení zkonstruovaného přípravku na vybraných vzorcích a vyhodnocení naměřených výsledků.

Abstract:

The objective of this thesis is to produce a jig for thermal expansion measurement of plastics and its testing, which is to verify the rightness of its design and functional solution.

The theoretical part comprises the description and analysis of basic types of plastics, their structure and characteristics which have an impact on thermal expansion.

The experimental part describes the selection of measurement elements and devices, which combine with the designed jig into a set for measurement and evaluation of thermal expansion of plastics.

The final section of thesis contains report of testing the jig on selected samples and the evaluation of measured results.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 25. května 2007

.....

Roman Balda
Matušova 31/5
40801 Rumburk 1

Poděkování

Rád bych především poděkoval doc. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za odborné vedení, cenné rady, připomínky a pomoc při zpracování této diplomové práce.

Další poděkování patří mým rodičům a přítelkyni za podporu po celou dobu studia.

OBSAH

SEZNAM ZKRATEK.....	8
1. Úvod.....	9
2. Teoretická část	11
2.1 Molekulová hmotnost	12
2.2 Molekulární síly	14
2.2.1 Intramolekulární síly	14
2.2.2 Intermolekulární síly	14
2.3 Tvar makromolekul a její vliv na teplotní roztažnost	15
2.3.1 Lineární makromolekuly	15
2.3.2 Rozvětvené makromolekuly.....	16
2.3.3 Zesíťované makromolekuly	17
2.4 Termoplasty.....	18
2.4.1 Amorfnní termoplasty	18
2.4.2 Semikrystalické termoplasty	19
2.5 Reaktoplasty	20
2.6 Kaučuky	21
2.7 Přebodové teploty polymerů	21
2.8 Teplotní roztažnost plastů	23
2.8.1 Koeficient délkové teplotní roztažnosti	24
2.8.2 Koeficient objemové teplotní roztažnosti	24
2.8.3 Vztah mezi koeficientem délkové a objemové teplotní roztažnosti.....	25
2.8.4 Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti.....	25
2.9 Parametry ovlivňující teplotní roztažnost	26
2.9.1 Stupeň krystalinity (SK).....	26
2.9.2 Orientace makromolekul	27
2.9.3 Vliv plniva.....	28
2.9.4 Faktory zkreslující výslednou hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti	30
2.9.5 Vnitřní pnutí	30
2.10 Způsoby měření CLTE.....	31
2.10.1 Mechanické dilatometry.....	31
2.10.2 Termomechanická analýza (TMA)	32
2.10.3 Interferometrické měření.....	33
3. Experimentální část.....	34

3.1 Norma ČSN 64-0528 (Stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti)	34
3.1.1 Podstata metody	34
3.1.2 Termíny a definice	35
3.1.3 Přístroje a pomůcky.....	35
3.1.3.1 Temperační komora	35
3.1.3.2 Měřicí a úložný systém	35
3.1.3.3 Zařízení na měření teploty	36
3.2 Měřicí člen	36
3.2.1 Digitální úchylkoměr Mitutoyo 543-250B	36
3.3 Temperační komora	37
3.3.1 Laboratorní sušárna Ecocell 55 s přirozenou cirkulací vzduchu	37
3.4 Materiálové parametry dilatometru	38
3.4.1 Křemenné sklo	39
3.5 Uspořádání přípravku při měření délkové teplotní roztažnosti.....	39
3.5.1 Horizontální uspořádání	40
3.5.2 Vertikální uspořádání	41
3.6 Rozměry měřených vzorků	41
3.7 Schematický návrh přípravku pro měření délkové teplotní roztažnosti.....	42
3.8 Návrh modelu přípravku v softwaru Solid Works 2006	43
3.9 Funkční princip přípravku.....	47
3.10 Výroba jednotlivých částí přípravku	48
3.10.1 Výroba měřicí tyčky a dilatačních trubic	48
3.10.1.1 Tlak na vzorek od měřicí tyčky	49
3.10.2 Výroba pružiny.....	49
3.11 Montáž přípravku do laboratorní sušárny	50
3.12 Výměna měřicí tyčky	52
3.13 Odzkoušení přípravku	53
3.14 Výsledky měření a jejich diskuze	56
3.14.1 Polypropylen PP108MF10	56
3.14.2 PP/PS Elan XP 515	57
3.14.3 Polyoxymethylen POM Delrin 900P NC10.....	58
3.14.4 Ocelový vzorek	59
4. Závěr	60
Seznam použité literatury.....	61

SEZNAM ZKRATEK

CLTE	- koeficient délkové teplotní roztažnosti [$10^{-6}/K$]
TMA	- termomechanická analýza
PVC	- polyvinilchlorid
PP	- polypropylen
HDPE	- vysokohustotní polyethylen
LDPE	- nízkohustotní polyethylen
PF	- polyformaldehydová pryskyřice
T_g	- teplota skelného přechodu [$^{\circ}C$]
T_m	- teplota tání [$^{\circ}C$]
T_f	- teplota viskózního toku [$^{\circ}C$]
α	- koeficient délkové teplotní roztažnosti [$10^{-6}/K$]
β	- koeficient objemové teplotní roztažnosti [$10^{-6}/K$]
SK	- stupeň krystalynity [%]
M	- molekulová hmotnost [$kg \cdot mol^{-1}$]
M_o	- molekulová hmotnost strukturní jednotky [$kg \cdot mol^{-1}$]
y	- polymerační stupeň [1]
l_0	- počáteční délka [m]
l	- konečná délka [m]
V_0	- počáteční objem [m^3]
V	- konečný objem [m^3]
ΔT	- rozdíl teplot [$^{\circ}C$]
PC	- osobní počítač

1. Úvod

S plasty se v dnešní době setkáváme téměř na každém kroku, spektrum jejich použití je velmi široké (v obalové technice, ve strojírenství, stavebnictví, elektrotechnickém a textilním průmyslu, ve všech oblastech dopravy atd.). Důvodem jsou jejich vlastnosti, které jsou často výhodnější, než u klasických přírodních materiálů. Zvláště se cení nízká měrná hmotnost, která je až 8 krát menší, než u oceli. Některé plasty předčí kovy svou odolností vůči chemikáliím (včetně silných kyselin a zásad). Všeobecně mají plasty velmi dobré tepelně-izolační i elektroizolační vlastnosti. U plastů plněných skelnými, nebo uhlíkovými vlákny je možné dosáhnout i vysokých mechanických hodnot. Hlavními přednostmi plastů jsou výborná a rychlá zpracovatelnost, vysoce produktivní a ekonomicky výhodná výroba.

U plastů je ovšem třeba počítat i s některými limitujícími faktory, které ovlivňují oblast jejich použití. Patří k nim relativně nízká teplotní odolnost. Změny teploty mají oproti kovům za následek daleko významnější změny fyzikálních, mechanických i elektrických vlastností a teplota, při které se výrobek používá, ovlivňuje jeho výsledné rozměry.

Jedna z hlavních technologií, která se uplatňuje při zpracování plastů je vstřikování, které umožňuje vysokou produkci standardních výrobků, u nichž lze dosáhnout výborných vzhledových i funkčních vlastností. Při této technologii zpracování se objevuje problematika rozměrové přesnosti a také rozměrové stálosti finálních výrobků. To ve svém důsledku komplikuje použití výrobků v technicky náročných aplikacích, nebo při kompletaci kombinovaných plastových dílů (např. spojení plast-kov), kdy jednotlivé součásti musí přesně lícovat i při použití rozdílných teplot. Proto byla zavedena pro každý materiál hodnota, která stanovuje lineární změnu rozměru v určité oblasti zvýšených teplot a tato hodnota se nazývá „koeficient délkové teplotní roztažnosti“ (CLTE).

Teplotní roztažnost patří mezi základní teplotní vlastnost materiálu, která může být při konstrukčním návrhu dílu velice důležitá a významná. Ačkoliv je již mnoho zveřejněných výsledků o koeficientu teplotní roztažnosti pro standardní plasty a plasty obecně, je potřeba tuto vlastnost znát pro každý specifický materiál v určitém rozsahu teplot. V některých případech (např. u nových nebo speciálních typů plastů, kompozitů, polymerních směsí, atd.) nebyla data o koeficientech teplotní roztažnosti vůbec publikována. U ostatních materiálů mohou být data známá (eventuelně

dodatečně změřená), ale mohou zahrnovat nesprávný teplotní rozsah, aplikovaný na trochu jiný materiál, nebo být jinak nevhodná pro zvolenou aplikaci.

Na rozdíl od mechanických vlastností, kde pro jejich vyhodnocení existuje mnoho metod a měřicí techniky, pro měření a vyhodnocení teplotní roztažnosti je postupů a měřících přístrojů podstatně méně. Mezi dnes nejpoužívanější a nejrozšířenější metody pro měření plastů patří termomechanická analýza (TMA) nebo měření teplotní roztažnosti pomocí dilatometrů. Existují i další metody, jako je laserová interferometrie, optické snímání, rentgenová difrakce nebo použití extenzometrů, ale tyto metody jsou využívány převážně pro jiné materiály než plasty, nebo pro konkrétní případy, kde jiná metoda není dostačující, nebo vhodná.

Na základě výše popsaných důvodů a obecně známých výsledků a metod řešení, které jsou poměrně omezené, byla zadána tato diplomová práce, jejíž podstatou je návrh, konstrukce a odzkoušení přípravku pro měření koeficientu délkové teplotní roztažnosti (CLTE) plastů. Diplomová práce má tři hlavní části – rešeršní, experimentální a diskusi výsledků. V teoretické části je proveden popis a rozbor základních druhů plastů, jejich struktury a základních vlastností, které mají na koeficient teplotní roztažnosti výrazný vliv. Dále jsou popsány jednotlivé základní metody pro měření CLTE. V experimentální části je popis navrženého řešení a konstrukce měřícího zařízení včetně „manuálu“ pro vlastní proces měření a odzkoušení na vybraných plastech. V diskuzi je provedeno vyhodnocení získaných výsledků a zhodnocení navrženého řešení měřícího zařízení.

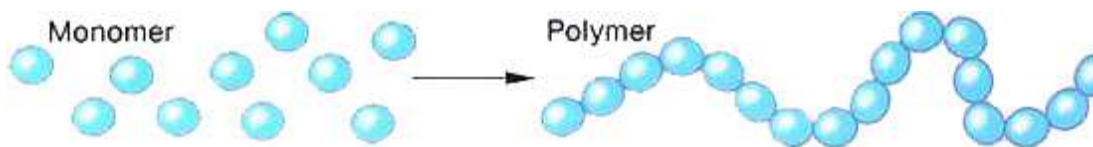
2. Teoretická část

Plasty jsou materiály, jejichž podstatu tvoří makromolekulární látky. Plasty mohou být přírodní, nebo dnes nejrozšířenější synteticky vytvořené, např. polystyren, polyetylén a polyamid atd. Jejich základní mechanické a fyzikální vlastnosti jsou určeny především:

- molekulovou hmotností (viz kap. 2.1)
- molekulární strukturou (viz kap. 2.3)
 - lineární struktura
 - rozvětvená struktura
 - zesíťovaná struktura
- nadmolekulární strukturou (viz kap. 2.4)
 - amorfní struktura
 - krystalická struktura

Vzhledem ke kombinačním možnostem v organické chemii jsou možnosti vývoje nových typů téměř neomezené.

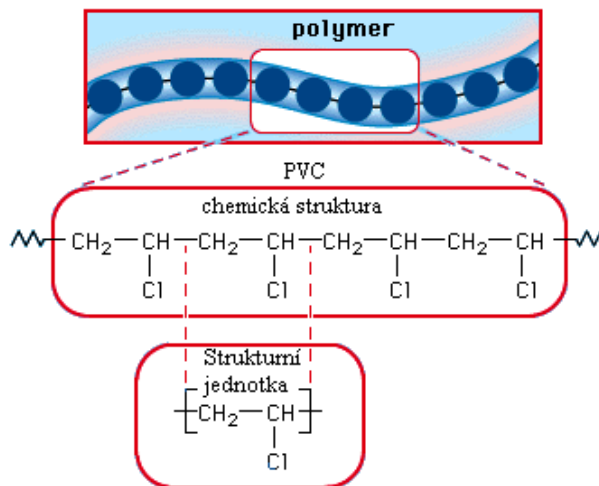
Za makromolekulární látky se považují takové materiály, jejichž molekulová hmotnost je vyšší než 10^4 a které se připravují polyreakcemi. Existují tři základní druhy chemických reakcí, a to polymerace, polykondenzace a polyadice, což jsou ve své podstatě jednoduché chemické reakce, které se však musí mnohokrát opakovat. Opakování reakce je umožněno vhodnou chemickou strukturou výchozích nízkomolekulárních látek, které se označují jako monomer. Spojením mnoha monomerních jednotek vzniká polymer (makromolekulární látka) viz obr. 2.1. [1]



Obr. 2.1 Polymer vznikající spojováním monomerních jednotek.

2.1 Molekulová hmotnost [1]

U makromolekulární látky je důležitou vlastností její molekulová hmotnost, která vyjadřuje velikost makromolekuly. Je to bezrozměrné číslo, neboť se jedná relativní hodnotu vzhledem k atomu kyslíku. Vedle molekulové hmotnosti je často velikost udávána pomocí polymeračního stupně y . Ten představuje počet strukturních jednotek obsažených v makromolekule (viz obr. 2.1). Mezi polymeračním stupněm y a molekulovou hmotností M platí vztah ve tvaru:

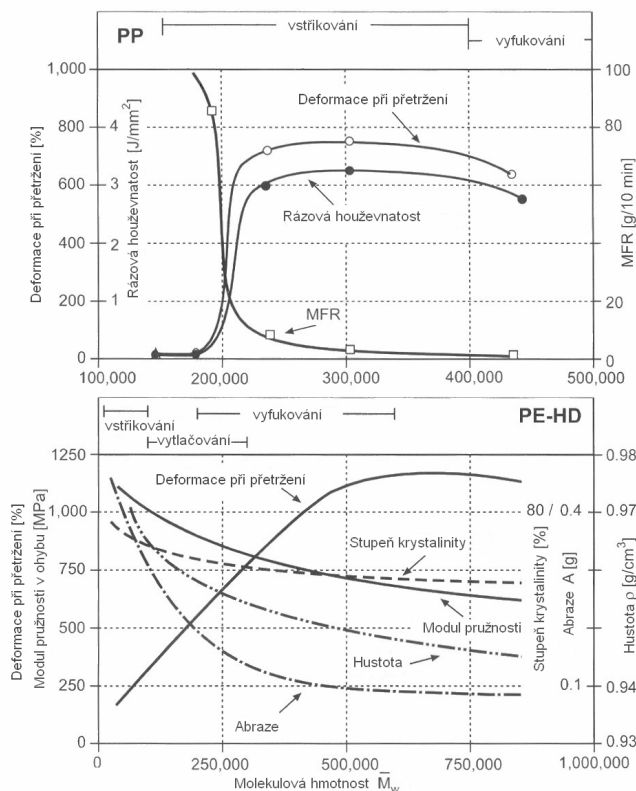


Obr. 2.1 : Strukturní jednotka a chemická struktura PVC [2].

$$M = M_0 \cdot y \quad (1)$$

M_0 je molekulová hmotnost strukturní jednotky. Jedná se ovšem o průměrné hodnoty, protože v polymeru jsou zastoupeny makromolekuly různých délek. Aby dnešní plasty vykazovaly vhodné vlastnosti pro technickou praxi, musí být molekulová hmotnost větší než 10^4 a polymerační stupeň musí překročit hodnotu 50 až 80, což závisí na velikosti strukturní jednotky. Plasty vznikající polymerací musí vykazovat vyšší polymerační stupeň (řádově 10^3), než polymery připravované polykondenzací nebo polyadící (řádově 10^2). Toto tvrzení se pochopitelně týká termoplastů, protože u reaktoplastů je hustota zesíťování tak velká, že se molekulová hmotnost vůbec nedá experimentálně stanovit [1].

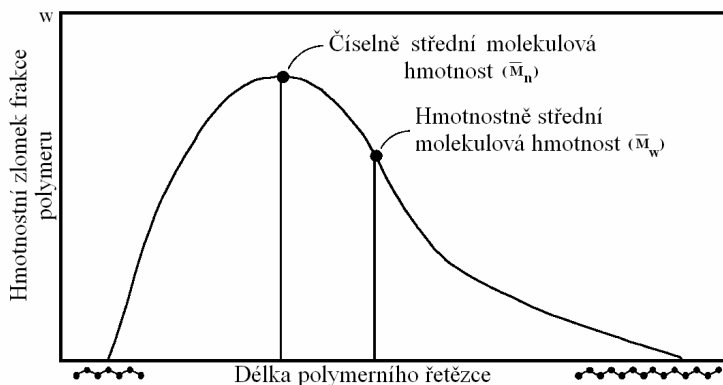
Mezi velikostí makromolekul a mechanickými i fyzikálními vlastnostmi polymeru existuje přímá závislost (viz obr.2.2). S rostoucí molekulovou hmotností jsou např. mechanické vlastnosti vyšší, ale zpracovatelnost vzhledem k délce makromolekul se zhoršuje. Proto je v praxi nutné volit kompromis mezi dobrými mechanickými i fyzikálními vlastnostmi a zpracovatelností a jim přizpůsobit velikost molekul [1].



Obr. 2.2 :Závislost mechanických a fyzikálních vlastností polypropylenu (PP) a vysokohustotního polyethylenu (PE-HD) na molekulové hmotnosti [3].

Distribuční křivka vyjadřuje vztah mezi relativním podílem molekul určité velikosti v původním polymeru a molekulovou hmotností této frakce. Ke stanovení molekulové hmotnosti lze použít různé experimentální metody. Získaná hodnota představuje pouze průměrnou čili střední hmotnost a její konkrétní hodnota závisí na druhu použité metody. Podle metody se při stanovení molekulové hmotnosti uplatní buď počet molekul a výsledkem je číselně střední molekulová hmotnost M_n , nebo je výsledná hodnota funkcí hmotnosti molekul. Ta se nazývá hmotnostně střední molekulová hmotnost M_w . Poměr M_w/M_n se nazývá koeficient polydisperzity a je mírou šířky distribuce molekulových hmotností. U typických polymerů s dobrými mechanickými vlastnostmi se jeho hodnota pohybuje mezi 1,5 až 2. Čím více se blíží jedné, tím jsou vlastnosti polymeru lepší [1].

Průmyslově vyráběné termoplasty tedy vždy obsahují molekuly s vysokým i nízkým polymeračním stupněm, někdy je dokonce přítomen i zbytek nezregenerovaného monomeru. Tyto látky nazýváme polydisperzní a jev polydisperzita. Jeho vyjádřením jsou hmotnostní distribuční křivky, které se získávají vynesemím závislosti hodnot hmotnostních zlomků w_i polymerních frakcí a hodnot molekulové hmotnosti M_i příslušné frakce [1] (viz obr. 2.3).



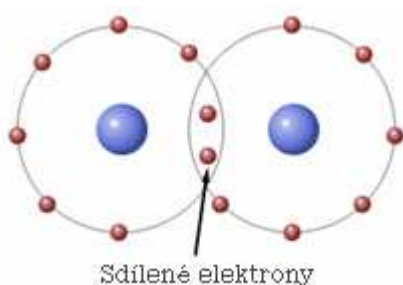
Obr. 2.3 : Distribuční křivka polymeru.

2.2 Molekulární síly

Molekulární síly jsou důležitým faktorem určujícím vlastnosti polymerů a jejich teplotní roztažnost. Čím vyšší jsou molekulární síly, tím je menší volnost pohybu makromolekul a teplotní roztažnost materiálu se snižuje.

2.2.1 Intramolekulární síly

Jsou to síly, které působí uvnitř jedné makromolekuly a spojují mezi sebou jednotlivé atomy. Jedná se o primární vazebné síly, u kterých převažujícím typem jsou vazby kovalentní (viz obr. 2.4), které jsou chemického charakteru. Jejich základem je sdílení jednoho, dvou či tří elektronových párů ve valenčních sférách dvou sousedících atomů [1].



Obr. 2.4 : Kovalentní vazba[2]

2.2.2 Intermolekulární síly

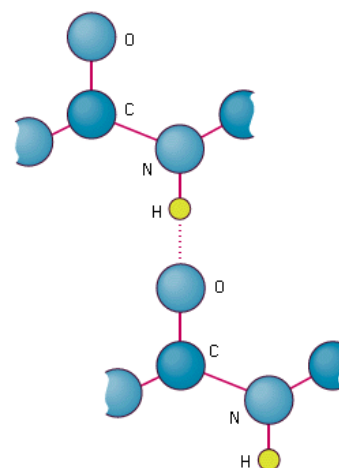
Jsou to síly mezimolekulární a působí mezi molekulami navzájem. Často jsou označovány jako síly sekundární. Ovlivňují nejen vzájemnou soudržnost makromolekul, ale i mechanické vlastnosti polymerů, jejich rozpustnost a další vlastnosti. Mezimolekulová koheze rychle klesá s rostoucí vzájemnou vzdáleností

molekul, nejčastěji se šestou mocninou. Jakékoliv oddálení sousedních molekul, způsobené např. rozvětvením řetězců, má za následek snížení mechanických vlastností. Rovnovážná vzdálenost molekul je určena rovnováhou mezi přitažlivými a odpudivými silami [1].

Velikost sekundárních sil nezávisí pouze na mezimolekulární vzdálenosti, ale také na délce makromolekul a teplotě. Při zvyšující se teplotě mezimolekulární síly klesají, což se projevuje zvýšením pohyblivosti makromolekul a následným nárůstem teplotní roztažnosti. Naproti tomu se síly zvyšují se zvětšující se délkou molekul a u dlouhých makromolekul mohou nabýt hodnot srovnatelných s primární vazbou.

U některých polymerů má pro soudržnost makromolekul velký význam vodíkový můstek (viz obr. 2.5). Je možno jej považovat za zvláštní případ mezimolekulové síly nebo, za slabou chemickou vazbu. Tvoří totiž přechod mezi primárními a sekundárními vazbami.

Základem vodíkového můstku je vazba atomu vodíku současně na dva elektronegativní atomy, přičemž každý z nich přísluší jiné molekule. Oba tyto atomy musí nést poměrně silný záporný náboj. Vodíkový můstek se vyskytuje například u polyamidů, díky němuž dosahuje nejen vysoké pevnosti, ale i vysoké teploty tání a oproti polymerům bez vodíkového můstku také menší teplotní roztažnost [1].



Obr. 2.5: Vodíkový můstek[2].

2.3 Tvar makromolekul a její vliv na teplotní roztažnost

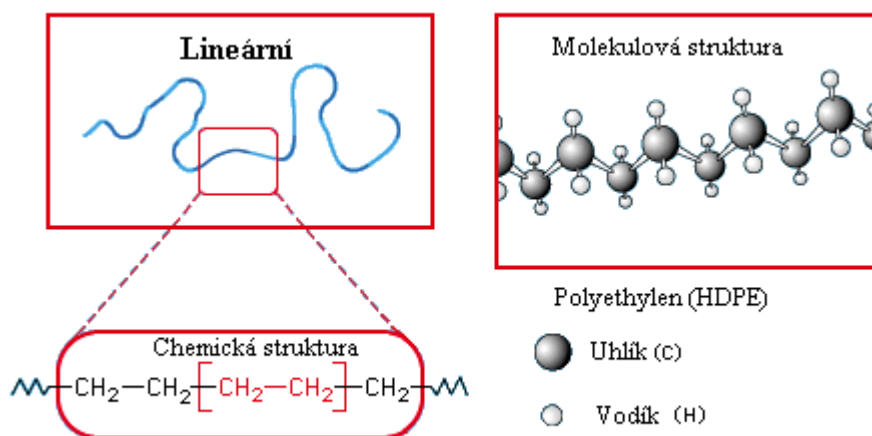
Vlastnosti polymerů, ale také i jejich teplotní roztažnost, nelze posoudit jen podle molekulové hmotnosti, ale je za potřebí znát další vlastnosti polymerů, které mají na teplotní roztažnost vliv. Mezi důležité vlastnosti patří tvar makromolekul.

2.3.1 Lineární makromolekuly

Odpovídají nejjednoduššímu hladkému řetězci a vznikají tak, že se monomerní molekuly řadí jedna vedle druhé „jako uzle na laně“ (viz obr. 2.6).

Z termodynamických důvodů nemají tvar rovné nitky, ale jsou stočeny do spirály nebo klubíčka. Lineární makromolekuly se mohou z prostorových důvodů více přiblížit jedna ke druhé a vyplnit tak kompaktnější prostor. Polymery tak mají vyšší hustotu.

Lineární makromolekuly také snáze vytvářejí prostorově pravidelné shluky krystalických struktur, mají vyšší obsah krystalických podílů a dosahují vyšší stupeň krystalinity. Plasty s lineárními makromolekulami jsou obvykle dobře rozpustné a tavitelné (dobrá pohyblivost makromolekul), v tuhém stavu se vyznačují houževnatostí a ve formě tavenin dobrou zpracovatelností [5].



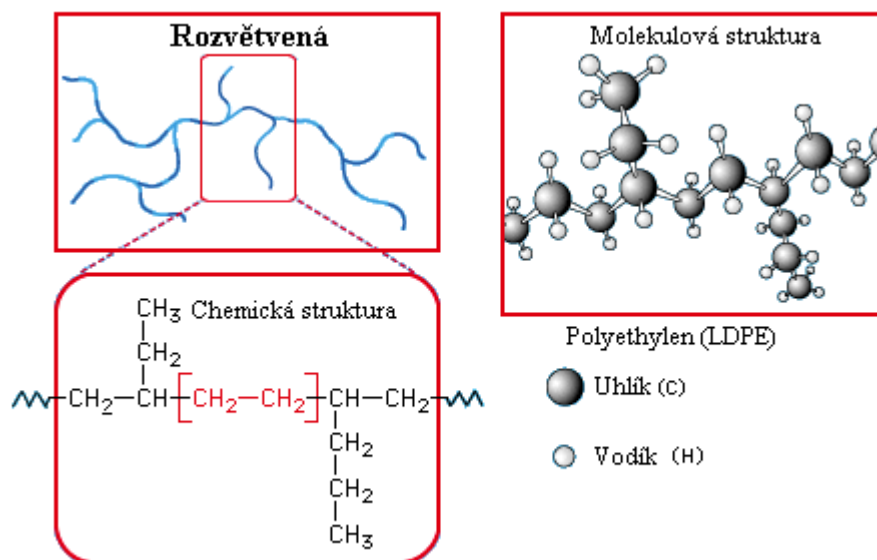
Obr. 2.6 : Molekulová a chemická struktura lineárního vysokohustotního polyethylen (HDPE) [2].

2.3.2 Rozvětvené makromolekuly

Na rozdíl od lineárních makromolekul se vyznačují tím, že mají na základním řetězci boční větve (viz obr. 2.7). Vliv rozvětvení na konečné vlastnosti závisí nejenom na velikosti bočních řetězců, ale i na jejich množství, kde se s jejich počtem snižuje teplota tání, materiál se stává ohebnější a měkčí.

Rozvětvené makromolekuly se nemohou v důsledku bočních větví jedna ke druhé dostatečně přiblížit, proto se tyto plasty vyznačují nižší hodnotou hustoty. Uspořádanost jejich shluků je nízká a tudíž hůře krystalizují a mají tedy i nižší stupeň krystalinity. Rozvětvení zhoršuje také pohyblivost makromolekul, při které se snižuje teplotní roztažnost a tekutost v roztaveném stavu, se kterou snižuje i tendence ke krystalizaci, která může zcela vymizet a polymer se stává amorfni. Boční řetězce,

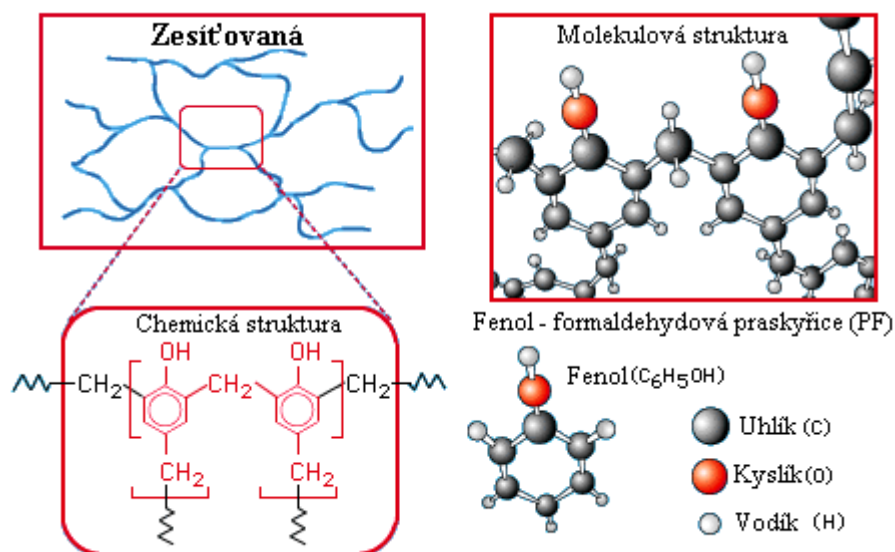
které způsobují oddálení sousedních makromolekul, mají za následek pokles mezimolekulárních sil a tím zhoršení většiny mechanických vlastností [5].



Obr. 2.7: Molekulová a chemická struktura rozvětveného nízkohustotního polyethylenu (LDPE)[2].

2.3.3 Zesíťované makromolekuly

V tomto případě je několik lineárních nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců mezi sebou propojeno vazbami (viz obr. 2.8), takže vytvářejí jednu takřka nekonečnou makromolekulu – prostorovou síť.



Obr. 2.8 : Molekulová a chemická struktura zesíťované fenol - formaldehydové pryskyřice (PF)[2].

Příčné vazby, kterými jsou makromolekuly drženy nejsou fyzikální, ale chemické povahy. Takováto síť potom vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti polymeru. Zesíťované polymery vykazují vysokou tvrdost, tuhost a odolnost proti zvýšené teplotě, nižší koeficient teplotní roztažnosti a nízkou odolnost proti rázovému namáhání. Sítě mohou být řídké, které jsou charakteristické pro elastomerní kaučukovité polymery nebo husté, ze kterých se stávají reaktoplasty [5].

2.4 Termoplasty

Jsou to makromolekulární látky, které jsou při zahřívání schopny přecházet do plastického stavu a v tomto stavu jsou dále tvářitelné. Zpět do stavu pevného se musí teplota snížit pod určitou mez, která je pro daný plast typická.

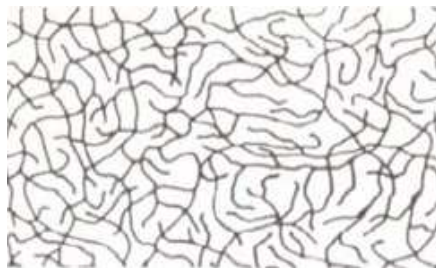
Při zahřívání nastávají pouze změny fyzikální povahy, ale chemická struktura plastu se nemění. Tento proces, kdy se mění stav plastický zpětně na tuhý stav a naopak, se dá teoreticky opakovat donekonečna. Avšak ve skutečnosti při zvýšené teplotě dochází za působení vzdušného kyslíku k nežádoucí degradaci polymeru, což se projevuje zhoršením jeho vlastností. Rychlost degradace se zvyšuje se stoupající teplotou a stupeň degradace na délce jeho působení. U některých plastů podporují degradaci specificky působící látky, přítomné třeba jen v nepatrných množstvích, např. stopy vody nebo těžkých kovů [1].

Vzhledem ke své nadmolekulární struktuře a schopnosti makromolekul dosáhnout většího či menšího stupně uspořádanosti se dají termoplasty dále rozdělit na amorfní a semikrystalické. Obecně vyšší teplotní roztažnost vykazují semikrystalické termoplasty, ale není to jednoznačně dáno, jelikož je mnoho dalších faktorů, které to mohou ovlivnit, např. přidání přísad, nebo orientací makromolekul (viz kap. 2.9).

2.4.1 Amorfní termoplasty

Amorfní strukturou rozumíme strukturu bez jakékoliv uspořádanosti (viz obr. 2.9). Základním morfologickým útvarem této struktury jsou globuly (nebo-li klubička) o velikosti 10 až 30 nm, které jsou vytvořeny z chaoticky stočených makromolekul (viz obr. 2.10). Mohou se sice uspořádat vůči sobě navzájem do pravidelnějších útvarů, avšak každá globula si zachovává individuální charakter. Při působení vnějších sil dochází k orientaci makromolekul, které mohou vytvářet vyšší

formu uspořádanosti, tj. rozvinuté a paralelně sdružené svazky, které jeví náznaky krystalizace a připomínají nepravé krystality.



Obr. 2.9: Neuspořádaná struktura amorfního plastu [3]

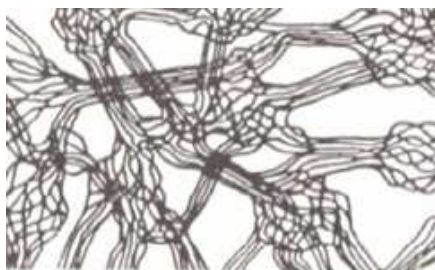


Obr. 2.10: Globula

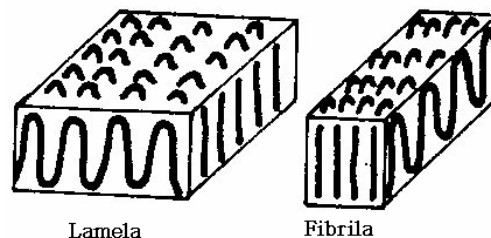
2.4.2 Semikrystalické termoplasty

Krystalická struktura se vyznačuje určitým stupněm uspořádanosti avšak nikdy nedosáhne 100% uspořádanosti makromolekul a proto se označuje jako semikrystalická (viz obr. 2.11). Mohou ji vykazovat pouze některé druhy termoplastů s příhodným tvarem makromolekul. Základním morfologickým útvarem jsou tzv. lamely (destičkovité útvary), které mají výšku 7- 17 nm a tloušťku 10 nm. Skládají se z jednotlivých proužků, přičemž jeden proužek odpovídá jedné makromolekule. Vzniká střídavým ohýbáním makromolekuly ve vzdálenosti odpovídající výšce lamely o 180° . Je-li roztok při krystalizaci vystaven smykovému namáhání, vznikají vláknité útvary tzv. fibrily. (viz obr. 2.12)

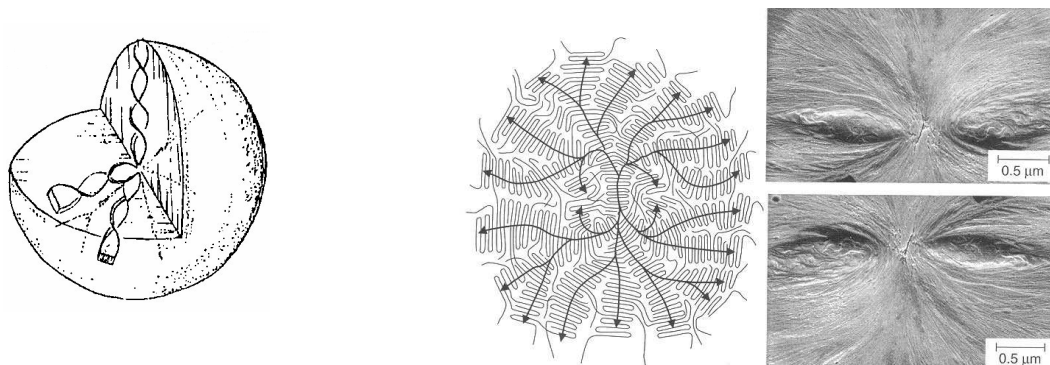
Při krystalizaci z taveniny plastu nejsou podmínky pro vznik lamel příznivé a vznikající krystalické lamely rostoucí ze stejného zárodku se deformují do spirály a jejich radiálním skládáním se vytvářejí složitější krystalické útvary sférického tvaru zvané sférolity, které tvoří tzv. sférolitickou strukturu (viz obr. 2.13) [6].



Obr. 2.11: Částečně uspořádaná struktura semikrystalického plastu [3]



Obr. 2.12: Lamela, fibrila [3]

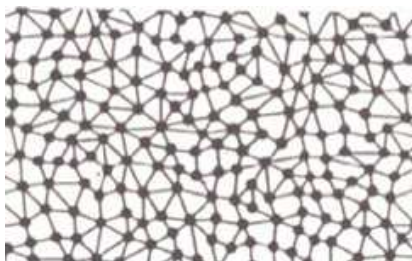


Obr. 2.13 : Sfěrolitická struktura: vlevo sfěrolit, vpravo sfěrolitická struktura SEM [3]

2.5 Reaktoplasty

V technické praxi také nazývané termosety (duroplasty) mají vždy na rozdíl od termoplastů amorfní strukturu. Přicházejí ke zpracování jako poměrně nízkomolekulární sloučeniny, které v první fázi zahřívání rovněž měknou a je možné je tvářet. Avšak tvářitelnost si podržují jen omezenou dobu, protože zahříváním se rozběhne polyreakce, zpravidla polykondenzace, která byla při výrobě polymeru v určité fázi přerušena a výsledkem je prostorově zesíťovaná struktura, která je pro reaktoplasty charakteristická. Tento děj, při kterém dochází k hustému příčnému zesíťování se nazývá vytvrzování a je nevratný (viz obr. 2.14). Zesíťování nastává až při tváření plastu vlivem tepla a tlaku, někdy působením katalyzátorů. Jakmile je zesíťování dokončeno, není další tváření možné, protože opětovným dodáváním tepelné energie není možné hmotu roztavit. Jednotlivé úseky makromolekul jsou totiž tak hustě propojeny chemickými vazbami, že celý výrobek je možno považovat za jednu velkou makromolekulu a při překročení určité teploty nastává trhání chemických vazeb v řetězcích a hmota degraduje [1].

Teplotní roztažnost, která je podmíněna zeslabováním mezimolekulárních sil a zvětšením pohyblivosti makromolekul je u reaktoplastů kvůli své zesíťované struktuře podstatně menší, než u termoplastů. Konkrétní hodnoty jsou závislé na hustotě zesíťování.



Obr.2.14: Zesíťovaná struktura reaktoplastu [3]

2.6 Kaučuky

Pro skupinu elastomerních polymerů, tzv. kaučuků, je charakteristické, že za normální teploty vykazují kaučukovitou pružnost.

Kaučuky jsou makromolekulární látky s dlouhými lineárními řetězci s molekulovou hmotností až 10^6 , obvykle kolem 200 000. Při působení mechanické síly v jednom směru dochází k orientaci, řetězce se vyrovnávají a často se objeví slabá krystalizace, kde se kaučuk zahřívá krystalizačním teplem. Po zrušení vnější síly se molekuly vracejí do původního tvaru, krystalická struktura opět mizí, kaučuk se ochlazuje a smršťuje se téměř do původního tvaru.

Požadovaných technických vlastností však kaučuky nabývají teprve vulkanizací. Vulkanizovaný kaučuk se nazývá pryž, která má mnohostranné uplatnění na technické a spotřební předměty.

Vlastnosti pryže ovlivňují vedle podmínek vulkanizace ještě různé příměsi, které spolu s výchozím kaučukem tvoří tzv. kaučukovitou směs. Patří sem vulkanizační činidla, urychlovače, aktivátory, antioxidanty, změkčovadla, plniva a ztužovala barviva [7].

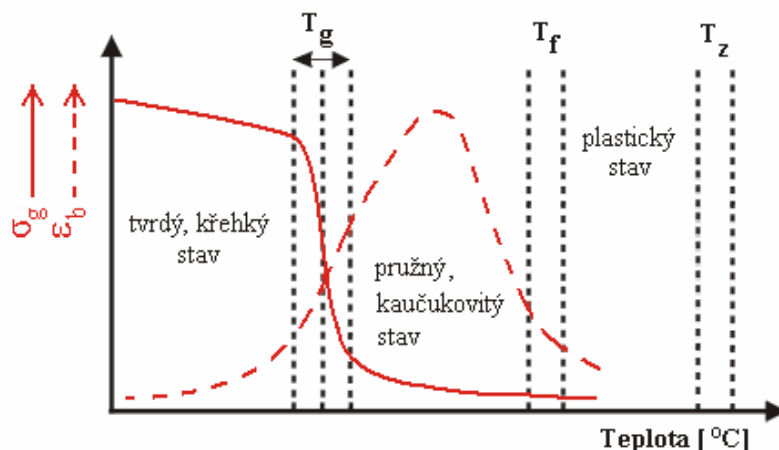
2.7 Přejíchodové teploty polymerů

Obdobně jako u jiných materiálů jsou vlastnosti polymerů i teplotní roztažnost závislé především na teplotě. V určité oblasti teplot probíhají tyto změny rychleji anebo se mění skokově [1]. Takové oblasti jsou nazývány přejíchodové a v těchto oblastech existují přejíchodové teploty T_g - teplota zeskelnění nebo teplota skelného přejíchodu, T_f - teplota viskózního toku (pro amorfní plasty), T_m - teplota tání (pro semikrystalické plasty).

U amorfních plastů se hodnota meze pevnosti v tahu (a také modulu pružnosti) v přejíchodové oblasti v okolí teploty zeskelnění T_g mění skokově (viz obr. 2.15), modul pružnosti asi o tři řády, koeficient teplotní roztažnosti o 100 % [1]. Konkrétní hodnota je závislá na velikosti mezimolekulárních sil (čím budou tyto síly větší, tím bude vyšší i teplota zeskelnění) a ohebnosti řetězců (čím bude ohebnost větší a mezimolekulární síly menší, tím bude nižší teplota zeskelnění).

Teplotu zeskelnění je možno ovlivnit např. přidavkem změkčovadel, které sníží mezimolekulární soudružnost a tím i T_g . Je tedy patrné, že nejnižší hodnotu teploty zeskelnění vykazují kaučuky, neboť mají malé mezimolekulární síly a značně

ohebné řetězce (-100 – -120 °C) a semikrystalické plasty (např. PE -120 °C, PP -10 °C). Amorfni termoplasty mají hodnotu teploty zeskenění výrazně nad teplotou okolí (např. PS 85° až 100 °C).

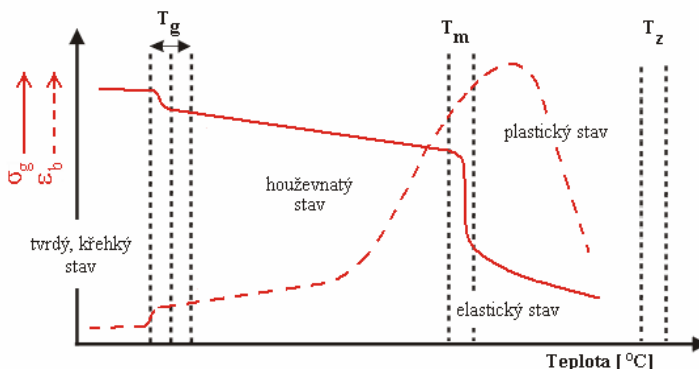


Obr. 2.15 : Přebodové teploty a průběh deformačních vlastností amorfního plasty

Při teplotě viskózního toku T_f narůstá intenzita změn vlastností polymeru. Při této teplotě ztrácí hmota své kaučukovité vlastnosti a mění se ve vysoce viskózní kapalinu. Nad touto teplotou leží oblast zpracovatelnosti materiálu. Zvýšením teploty klesají mezimolekulární síly a tím se snižuje i viskozita taveniny. Při dalším zvyšování teploty začne probíhat tepelná degradace polymeru (teplota T_z) [5].

Zesíťované amorfni polymery se ve srovnání s lineárními chovají odlišně. Tuhá síť chemických vazeb vylučuje přesuny makromolekul jako celku a proto lze u těchto materiálů nalézt při vysokých teplotách jen určitou kaučukovitou oblast s relativně vysokým modulem pružnosti, jehož hodnota pak zůstává konstantní až do teploty rozkladu.

U semikrystalických polymerů dochází k nejrychlejším změnám vlastností v oblasti teplot, kterou charakterizuje teplota tání T_m (viz obr.2.16) . Při teplotě tání dochází k rozpadu a tání krystalitů, což je provázeno změnou fáze hmoty, která přechází ze stavu tuhého do stavu kapalného. Je zřejmé, že tání se děje v určitém teplotním intervalu a teplota T_m představuje pouze střední hodnotu této oblasti, podobně jako teplota T_g . Konkrétní hodnota závisí na velikosti mezimolekulárních sil a na velikosti makromolekul. Zvětšení obou veličin má za následek zvýšení teploty tání [1].



Obr. 2.16 : Přechodové teploty a průběh deformačních vlastností semikrystalického plastu

Protože i semikrystalické polymery obsahují určité množství amorfních podílů, lze u nich stanovit teplotu zesklenní, která charakterizuje výrazné změny vlastností polymeru. Tyto změny se ovšem dotýkají pouze amorfni složky hmoty [5].

2.8 Teplotní roztažnost plastů

Teplotní roztažnost plastů je příčinou rozměrových i objemových změn plastových částí způsobených změnou teploty. Součinitel délkové teplotní roztažnosti α závisí na druhu plastu, jeho struktuře, na jeho složení a na uvažované teplotní oblasti [1] (viz kap. 2.7). Typické hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti vybraných plastů jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tab. 2.1 :Typické hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti vybraných plastů

Druh plastu	Koeficient teplotní roztažnosti α [$10^{-6}/K$] při 20°C *
PS	45
SAN	50
PMMA	50
PC	60
PVC	70
POM	80
PP	110
HDPE	150
LDPE	200
PTFE	70
PF	30
UF	20
EPSL	40

* uvedené hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti jsou pouze orientační a jejich skutečná hodnota se může výrazně lišit v závislosti na konkrétním typu materiálu, nebo teplotě při které byly zjišťovány.

Obecně je zvětšování objemu hmoty při zahřívání podmíněno zeslabováním mezimolekulárních sil a zvětšováním pohyblivosti makromolekul [1].

Z termodynamického hlediska lze tento pohyb makromolekul při rostoucí teplotě vysvětlit na základě Brownova pohybu makromolekul, který je závislý na teplotě. Podle charakteru se může jednat o Brownův mikropohyb, kdy vzájemná poloha makromolekul jedné vůči druhé se nemění a pohybu se účastní pouze části (segmenty) molekul, které vykonávají rotační nebo kývavý pohyb kolem střední polohy, nebo o Brownův makropohyb, kdy se molekuly pohybují jako celek, což se projevuje změnou vzájemné polohy [1].

Pod teplotou zesklenní T_g postačuje tepelná energie makromolekul pouze k vibracím, Brownův mikropohyb prakticky ustává, polymer je tvrdý a křehký. Při T_g se uvolňuje rotační pohyb segmentů molekul. Z tohoto důvodu vyplývá, že amorfní i semikrystalické termoplasty mají nad teplotou T_g asi o polovinu větší teplotní roztažnost než pod T_g . U semikrystalických plastů v oblasti mezi T_g a T_m platí, že teplotní roztažnost je tím menší, čím je vyšší stupeň krystalinity. Zajímavé je zjištění, že polymery s vyšším modulem pružnosti vykazují nižší teplotní roztažnost [1].

Polymery bez plniv mají koeficient teplotní roztažnosti asi o jeden řád vyšší než kovy. Přídavkem plniv s malou teplotní roztažností, jakou jsou skleněná vlákna, skleněná moučka, grafit a jiná, se součinitel teplotní roztažnosti snižuje.

2.8.1 Koeficient délkové teplotní roztažnosti

Je materiálová vlastnost, při kterém se těleso zahřáté na vyšší teplotu zvětší o určitou délku. Jednotka koeficientu délkové teplotní roztažnosti α je převrácenou hodnotou teploty.

$$[\alpha] = \frac{1}{K} \quad (2)$$

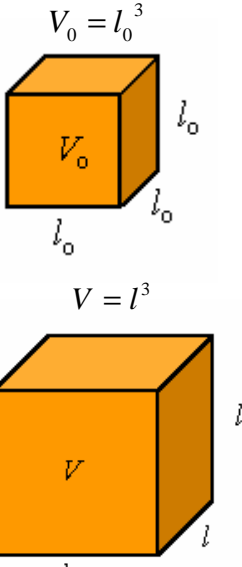
2.8.2 Koeficient objemové teplotní roztažnosti

Je to jev, při kterém se látka ohřívána na vyšší teplotu zvětší o objem, který je dán koeficientem objemové roztažnosti β . Jednotka koeficientu objemové teplotní roztažnosti je převrácenou hodnotou teploty.

$$[\beta] = \frac{1}{K} \quad (3)$$

2.8.3 Vztah mezi koeficientem délkové a objemové teplotní roztažnosti

Pro mnoho materiálu je hodnota délkové teplotní roztažnosti α anizotropická (v každém směru má jiné vlastnosti) a musí se zjišťovat v každém směru zvlášť, což záleží na typu materiálu a na jeho složení. Pro materiály, které mají vlastnosti izotropní (ve všech směrech stejné) přibližně platí, že hodnota koeficientu objemové teplotní roztažnosti β je rovna trojnásobku koeficientu délkové teplotní roztažnosti α (viz obr. 2.17).



$V_0 = l_0^3$

$V = l^3$

Důkaz:

$$V_0 = l_0^3 \quad (4)$$

$$V = l^3 = l_0^3 (1 + \alpha \cdot \Delta T)^3 =$$

$$= V_0 (1 + 3\alpha \cdot \Delta T + 3\alpha^2 \cdot \Delta T^2 + \alpha^3 \cdot \Delta T^3) \quad (5)$$

- vzhledem k nízkým hodnotám α vyšší mocniny zanedbáme

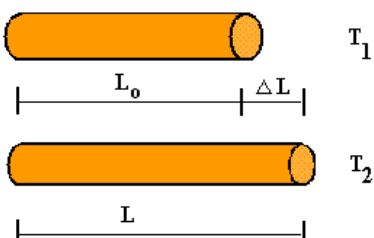
$$V = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta T) \quad (6)$$

$$\beta \approx 3\alpha \quad (7)$$

Obr. 2.17: Změna objemu zahřátého tělesa při platné rovnici $\beta \approx 3\alpha$

2.8.4 Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti

Střední přírůstek délky zkušebního tělesa vyvolaný zvýšením teploty z nižší na vyšší hranici teploty v daném teplotním rozmezí (viz obr. 2.18), se nazývá střední teplotní koeficient délkové teplotní roztažnosti a je stanoven přesným postupem podle zvolené normy .



T_1

T_2

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{T_2 - T_1} \quad (8)$$

Obr. 2.18: Změna délky tělesa ΔL při zahřátí z teploty T_1 na T_2

α střední koeficient délkové teplotní roztažnosti [$10^{-6}/K$]

T_1 nižší mezní teplota [K]

T_2 vyšší mezní teplota v [K]

ΔL přírůstek délky zkušebního tělesa vyvolaný změnou teploty (T_2-T_1) [m]

2.9 Parametry ovlivňující teplotní roztažnost

Parametry, které ovlivňují teplotní roztažnost plastů a mohou její velikost také výrazně měnit jsou stupeň krystalinity, orientace makromolekul a plniva. Jejich vzájemnou kombinací lze dosáhnout u stejného druhu plastu výrazně odlišných hodnot koeficientu teplotní roztažnosti.

2.9.1 Stupeň krystalinity (SK)

Stupeň krystalinity je důležitou proměnnou ovlivňující teplotní roztažnost. Stupeň krystalinity (viz tab. 2.2) vyjadřuje míru uspořádanosti ve struktuře, udává tedy relativní podíl krystalických oblastí ve hmotě na úkor amorfních.

Obecně s vyšším stupněm krystalinity klesá teplotní roztažnost. Je to dáno vlivem těsnějšího uspořádání makromolekul v krystalických oblastech a tím i větších soudržných sil [1]. Schopnost polymerů vytvářet uspořádanou strukturu se mění ve velmi širokých mezích. Především závisí na geometrickém tvaru řetězců, na objemu postranních substituentů a na počtu rozvětvení, případně délce postranních řetězců [9].

Tab. 2.2: Vybrané druhy plastů a jejich stupeň krystalinity

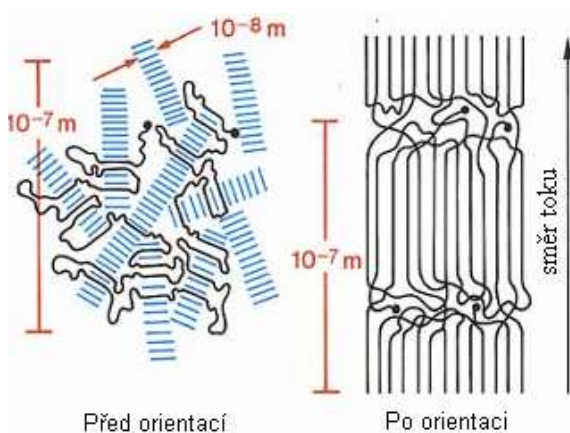
Druh plastu	Stupeň krystalinity [%]
PA 6	35 ÷ 45
PA 6.6	35 ÷ 45
POM	70 ÷ 80
PET	30 ÷ 40
PTFE	60 ÷ 80
PP	60 ÷ 80
HDPE	70 ÷ 80
LDPE	45 ÷ 60

Obecně vzniká krystalická struktura tím snadněji, čím je molekula symetričtější, řetězec hladší a pravidelnější. Tyto faktory mají větší vliv, než velikost přitažlivých sil, i když platí, že tendence ke krystalizaci se zvyšuje zvětšováním těchto sil. Velmi snadno krystalizuje polyethylen, který má jednoduchý a pravidelný řetězec umožňující těsné uspořádání. Stupeň krystalinity u lineárního polyethylenu dosahuje 70 až 80 %, u rozvětveného je nižší vlivem menší pravidelnosti asi 60%. Naproti tomu polyamid

vykazuje stupeň krystalinity nižší, asi 35 až 45%, přestože mezimolekulární síly jsou mnohem silnější než u polyethylenu. Podílí se na tom složitější tvar řetězce [1]. Lineární polyethylen má vyšší koeficient teplotní roztažnosti než polyamid, který má nižší stupeň krystalinity. Z toho vyplývá, že hodnocení vlivu SK na teplotní roztažnosti se může porovnávat pouze u stejného typu materiálu.

2.9.2 Orientace makromolekul

Orientace makromolekul nastává u zpracování termoplastů, u reaktoplastů se vlivem zesíťování neobjeví [3]. Polymery, které jsou tvořeny lineárními



Obr. 2.19 : Orientace makromolekul [2]

makromolekulami, lze účinkem vnějších sil při teplotě umožňující skluz a vzájemný tok molekul převést do orientovaného stavu (viz obr. 2.19). Dochází k paralelnímu uspořádání makromolekul i celých krystalických oblastí a čím více jsou makromolekuly vedle sebe, tím větší je stupeň orientace. Při vstřikování termoplastů se běžně nepravidelně

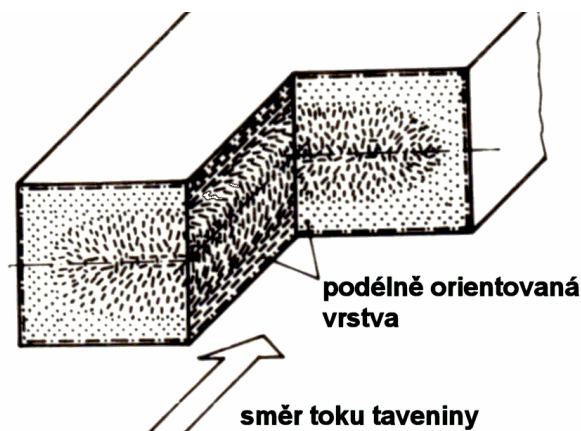
zkroucené makromolekuly díky vysokým smykovým napětím narovnávají ve směru toku a v této nerovnovážné poloze ztuhnou. Jestliže smykové napětí vyvolávající orientaci přestane působit dříve, než tavenina plastu ztuhne, snaží se narovnané makromolekuly zaujmout ihned zase svoji energeticky výhodnější zkroucenou polohu (dezorientace) a orientace se neobjeví, nebo jenom zčásti, v nízkém stupni.

Podmínky pro vznik orientované struktury nejsou ve všech místech výstřiku stejné a stupeň orientace se ve výstřiku může měnit jednak ve směru tloušťky stěny a také se vzdáleností od vtoku. Tenká vrstvička plastu, která se vytvoří na stěně formy „zamrzne“ dříve, než na ní začnou působit smyková napětí a zůstane neorientovaná. Stupeň orientace v ostatních vrstvách závisí na velikosti smykového napětí v daném místě [3].

Největší smyková napětí jsou ve vrstvě sousedící se ztuhlou povrchovou vrstvou a nacházejí se tedy v určité vzdálenosti pod povrchem výstřiku. Směrem k

ose smyková napětí klesají až k nule. Stejně se mění i orientace makromolekul, která je největší těsně pod povrchem a v ose není žádná nebo malá (viz obr. 2.20).

Orientace makromolekul vytváří anizotropii teplotní roztažnosti. Teplotní



Obr. 2.20 : Řez vstříkovaného vzorku a orientace makromolekul v jeho vrstvách [3]

roztažnost ve směru toku materiálu (ve směru orientace) bývá menší, než ve směru kolmém. Je to způsobeno tím, že makromolekuly, které vytvářejí lamely jsou ve směru orientace natahovány a zvyšují tak poměr stran lamely, u které se se zvyšující délkou snižuje šířka. Tento vzájemný poměr se může značně lišit podle stupně orientace.

Při zvětšujícím se poměru stran se lamela může chovat jako destička, která svými vlastnostmi připomíná vyztužující plnivo a omezuje tak roztažnost polymeru v podélném směru [10].

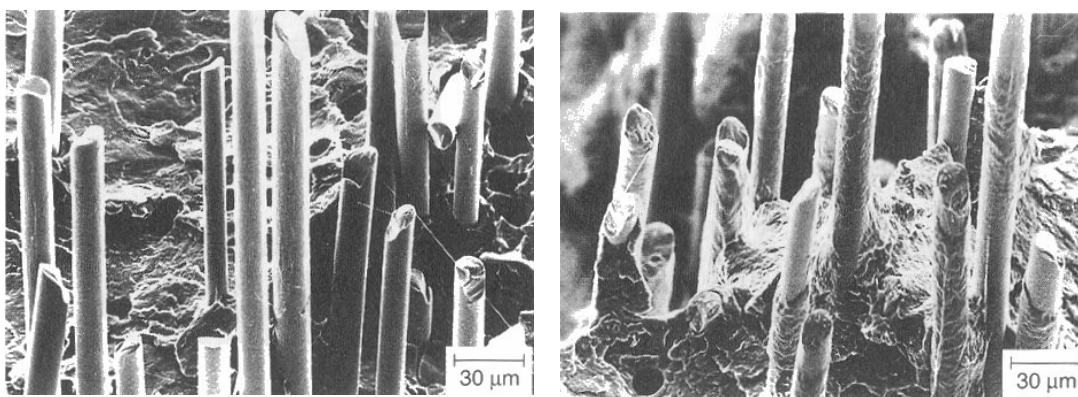
2.9.3 Vliv plniva

Neplněný plast je takový plast, u kterého množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice [5] a výsledné vlastnosti plastu se dají ovlivnit pouze změnou technologických parametrů.

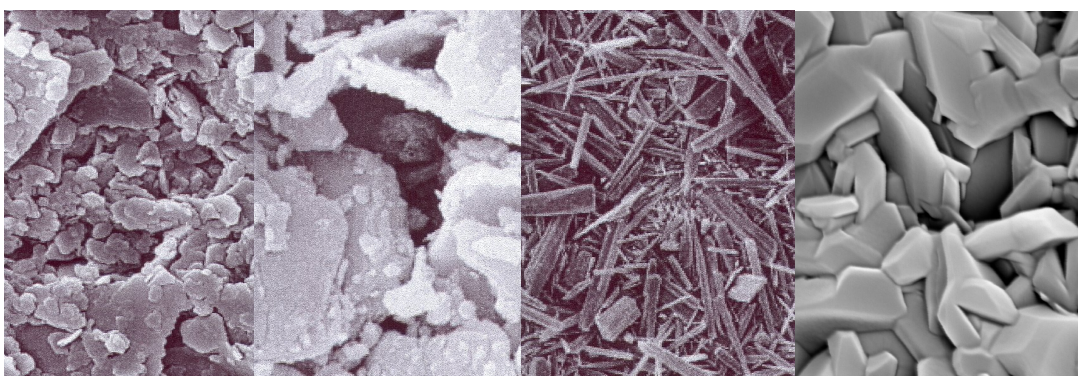
U plastů, kde je např. potřeba dosáhnout vyšší rozměrové stability a nestačí standardní neplněné plasty se použijí přísady. Makromolekulární látka plní funkci pojiva a určuje základní fyzikální a mechanické vlastnosti hmoty a plnivo pouze zlepšuje základní vlastnosti plastu.

Plniva zlepšují buď mechanické vlastnosti materiálu, chemickou odolnost či tvarovou stálost při zvýšené teplotě, jiné prostě jen hmotu zlevňují. Rozeznáváme vyztužující (skleněná, uhlíková, kovová či méně účinná bavlněná krátká nebo dlouhá vlákna, popř. textilní ústřížky do obsahu maximálně 50 %), a nevyztužující plniva ve formě prášku, které se přidávají většinou z důvodu snížení ceny materiálu [5] (moučka z břidlice, kaolinu, křídý a dalších levných materiálů, viz obr. 2.21) .

Pro správnou funkci vyztužujících plniv, musí být mezi plnivem a pojivem dobrá adheze jinak vyztužující vlastnost plniva pomíjí. (viz. obr. 2.20).



Obr. 2.20: Porušení plněného plastu- vlevo špatná adheze, vpravo dobrá adheze



Obr. 2.21: Nevýztužující plniva: zleva kaolin, křída, kovové částice, talek

Plniva které jsou ve tvaru vláken způsobují směrovou anizotropii. Je to způsobeno jejich teplotní roztažností, kterou může mít plněný plast i o dva řády nižší než makromolekulární látka. Podélný součinitel teplotní roztažnosti materiálu s plnivem je nižší, protože vlákna, která mají součinitel teplotní roztažnosti menší než polymerová matrice, tak omezují její protahování ve směru vláken. Příčný součinitel roztažnosti materiálu (kolmo na vlákna) při malých objemových podílech vláken může být i vyšší než součinitel teplotní roztažnosti u vlákny nezpevněného materiálu. Je to způsobeno omezenou roztažností ve směru vláken a matrice je nucená se roztahovat do směru příčného víc než je obvyklé [11].

Zvláštním případem plniva jsou skleněné kuličky o průměru několika setin milimetrů, které v závislosti na procentu plnění zvyšují tuhost, pevnost zvyšují jen málo, podstatně však zvyšují odolnost proti rázům. V některých případech i pro zlepšení rozměrové stability, kde anizotropie teplotní roztažnosti není tak výrazná, jako u vláken [5].

2.9.4 Faktory zkreslující výslednou hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti

Při měření teplotní roztažnosti plastů mohou některé faktory výslednou hodnotu změnit a nemusí odpovídat skutečné. Proto před vlastním měřením koeficientu teplotní roztažnosti je nutné tyto vlivy odstranit, nebo je alespoň snížit na minimum.

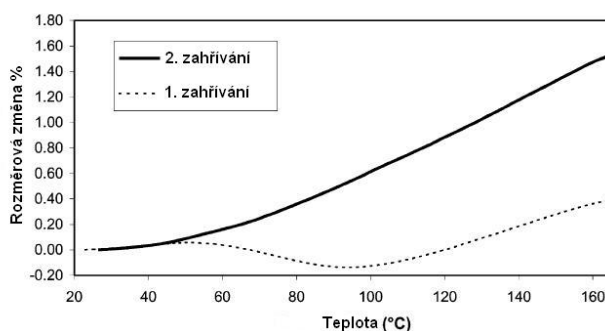
2.9.5 Vnitřní pnutí

Vnitřní pnutí vzniká při zpracování plastů nebo dodatečně ve výrobku. Rozlišujeme tyto druhy vnitřního pnutí: orientační, krystalizační, ochlazovací a expanzní. Všechna uvedená vnitřní pnutí spolu superponují a průměty v jednotlivých rovinách se algebraicky sčítají, takže výsledná napjatost je složitá a v objemu výrobku nerovnoměrně rozložená [12].

Pro přesné určení koeficientu teplotní roztažnosti α , by měly být výše popsané vlivy co nejvíce potlačeny, jelikož změřená hodnota koeficientu teplotní roztažnosti nemusí korespondovat s hodnotou skutečnou u reálného výrobku.

Prvním ohřevem výrobku se relaxace urychlí, vnitřní pnutí se snáze vyrovnávají a současně se usnadní i dezorientace (nad teplotou T_g), případně též dodatečná krystalizace struktury. Výsledkem jsou nevratné změny rozměrů výstřiku-dodatečné smrštění, které by se při měření jinak projevilo jako záporná hodnota koeficientu teplotní roztažnosti [13] (viz obr. 2.22).

Úmyslný ohřev za účelem odstranění vnitřního pnutí a uvedení struktury do rovnovážného stavu se nazývá temperace výstřiku. Podmínky temperace jsou u různých druhů plastů rozdílné, ale teplota temperování by měla být vždy nad T_g . Velmi důležité je, aby se výstřiky z temperační teploty na teplotu okolí ochlazovaly pomalu. Zabrání se tak vzniku nového ochlazovacího pnutí.



Obr. 2.22 : Vliv prvního a druhého ohřevu měřeného materiálu na rozměrovou změnu [13]

2.10 Způsoby měření CLTE

Při stanovení koeficientu lineární délkové roztažnosti je potřebné provést měření dvou fyzikálních veličin, a to změnu rozměru měřeného tělesa ΔL a jeho teploty T .

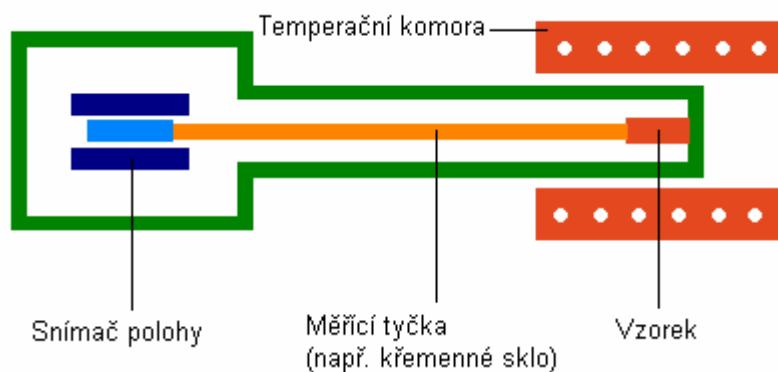
V současné době existuje řada metod a způsobů, které mohou být k tomuto měření použity. Tři z hlavních a nejpoužívanějších metod pro měření CLTE jsou dilatometry, termomechanická analýza (TMA) a interferometrie.

2.10.1 Mechanické dilatometry

Je to jedna z nejpoužívanějších metod pro měření teplotní roztažnosti. Zkušební vzorek je zahříván na požadovanou teplotu v peci, nebo jiném teplotním zařízení, které zajišťuje ohřev vzorku po celé jeho délce a změna rozměru měřeného vzorku je mechanicky přenášena k snímači polohy přes měřicí tyčku (viz obr. 2.23).

Přesnost je nižší, než u měření pomocí interferometrie a je použita u materiálů, které mají CLTE vyšší než $5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ při teplotě -180 až $900\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aby se nezanesla chyba měření teplotní roztažností materiálu do měření změny rozměru, měřicí tyčka by měla být zhotovená z materiálu s velmi nízkým, nebo známým koeficientem teplotní roztažnosti. Vhodný materiál je například křemenné sklo, které může být použito pro měření teplot do $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, kde se jeho koeficient teplotní roztažnosti v celém teplotním rozsahu téměř nemění. Další možný materiál je kysličník hlinitý, který umožňuje teplotu pro měření zvýšit až do $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [14].



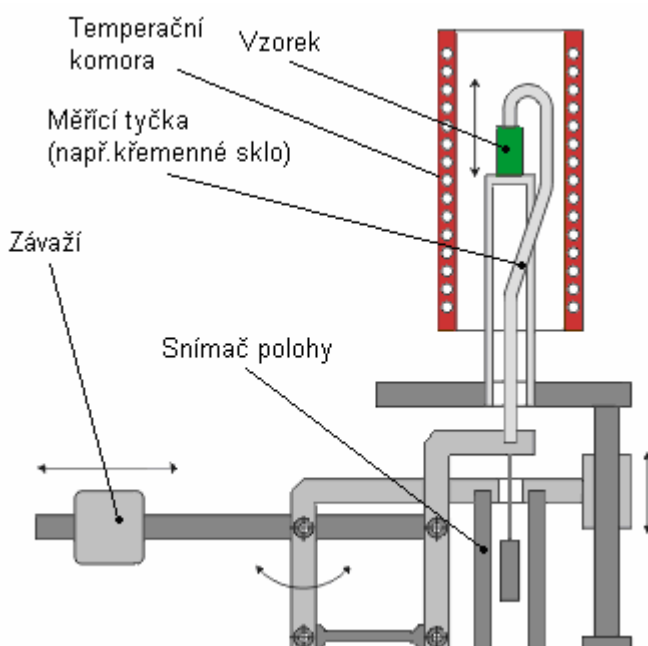
Obr. 2.23. Schéma horizontálního dilatometru [14].

2.10.2 Termomechanická analýza (TMA)

Termomechanická analýza je poměrně nová a moderní metoda, která snadno a rychle změří posunutí vzorku (roztahení, smrštění, teplotu měknutí, atd.) jako funkci teploty, času, nebo síly působící na vzorek. Obvykle je TMA používáno pro stanovení teplotní roztažnosti, teploty skelného přechodu a bodu měknutí materiálů s použitím konstantní síly a měnící se teploty.

Pracuje na podobném principu jako dilatometru. Vzorek je umístěný v temperační komoře, která je schopná ohřát vzorek rychlostí až $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. a následně stejnou rychlostí i zchladit. Změna rozměru je přenášena pomocí měřicí tyčky, která je uzpůsobená pro konkrétní velikost a tvar vzorku a její pohyb je zaznamenáván snímačem polohy. Oproti dilatometru je zde navíc mechanismus se závažím, který vyvozuje přítlačnou sílu na měřený vzorek a je možno ji nastavit (viz obr. 2.24).

TMA je schopna měřit změnu rozměru v rozlišení řádově 10 nm při teplotě okolí až do teploty $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15,16]. Některé přístroje dokáží pracovat i v ochranné atmosféře při minusových teplotách.



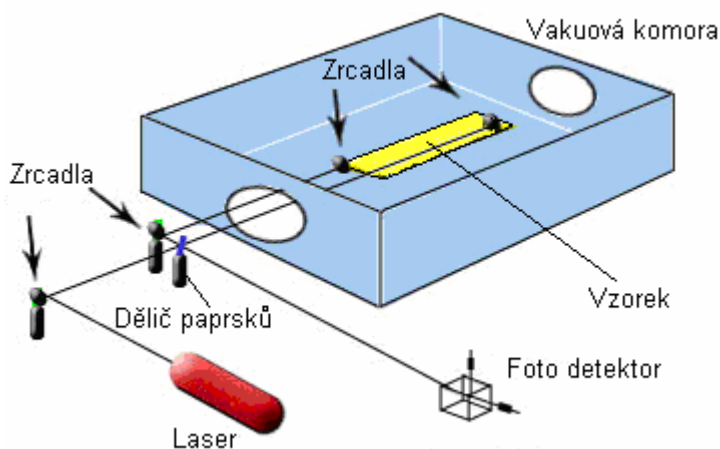
Obr. 2.24. Schéma termomechanického analyzátoru (TMA)[15].

2.10.3 Interferometrické měření

Použití interferometru k měření délky přímo na vzorku je méně běžné, ale zároveň velmi přesné, protože obsahuje méně mechanických kontaktních prvků, které snižují celkovou chybu měření.

Nejpoužívanějším interferometrem je jednopaprskový Michelsonův interferometr, kde měřený vzorek je umístěný na zrcadlovém povrchu ve vakuové komoře, která je zároveň temperační komorou. Pro odrazení paprsku laseru musí být povrch vzorku lesklý a pokud není, musí být umístěno malé zrcadlo i na druhém vrcholu vzorku. Posunutí konců vzorku je měřené pomocí snímače (foto detektoru), který převede počet vlnových délek na jednotky délky (viz obr. 2.25). V rámci počtu vlnových délek jednobarevného světla, což je v řádech nanometrů, se touto metodou mohou měřit materiály s koeficientem teplotní roztažnosti nižším než $5 \cdot 10^{-6}/\text{K}$.

Oproti dilatometrii nebo TMA je tato metoda přesnější, ale má své omezení a to v teplotním rozsahu (max. do 700°C), v rozměrech zkušebního vzorku, typu vzorku a je i finančně nákladnější [16].



Obr. 2.25 : Michelsonův jednopaprskový interferometr

3. Experimentální část

Cílem této diplomové práce bylo zkonstruovat a odzkoušet přípravek pro měření a vyhodnocení koeficientu délkové teplotní roztažnosti. Přípravek pro měření délkové teplotní roztažnosti byl navržen a zkonstruován tak, aby splňoval podmínky pro měření, které jsou dány normou ČSN 64 – 0528 pro stanovení délkové teplotní roztažnosti plastů .

V experimentální části práce byly zvoleny jednotlivé členy měřicího systému, který se skládá z laboratorní sušárny jako členu pro ohřev měřeného tělesa, digitálního úchylkoměru na měření změny rozměru měřeného vzorku a samotného přípravku pro měření délkové teplotní roztažnosti.

Přípravek zajišťuje uložení měřeného vzorku v laboratorní sušárně a musí být navržen tak, aby byl schopný při měření stanovit přesný koeficient délkové teplotní roztažnosti měřeného vzorku.

V další části experimentu je popsán předběžný schematický návrh přípravku, který je následně vymodelován jako 3D model v softwaru Solid Works 2006, který zobrazuje skutečnou podobu a rozměry vyrobeného přípravku.

Z konečného funkčního návrhu přípravku je zhotovená výrobní dokumentace, podle které je přípravek vyroben a sestaven. Po vyrobení je přípravek odzkoušen na vybraných plastových vzorcích a naměřené hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti jsou porovnány s tabulkovými hodnotami.

3.1 Norma ČSN 64-0528 (Stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti)

Tato norma předepisuje metodu a technická kritéria pro stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti. Při návrhu přípravku bylo postupováno tak, aby přípravek a celý měřicí systém splňoval parametry dané touto normou.

3.1.1 Podstata metody

Podstatou metody je měření délkového přírůstku měřeného vzorku v důsledku zvýšení jeho teploty v daném teplotním rozmezí.

Metoda stanoví skutečnou teplotní roztažnost, která se nevztahuje na změny rozměrů v důsledku změn obsahu vlhkosti nebo změkčovadel a rozpouštědel a

rozměrových změn způsobených vytvrzením, odstraněním vnitřních pnutí a podobných faktorů.

Metoda předpokládá lineární závislost změny délky měřeného vzorku na teplotě v daném teplotním rozmezí .

3.1.2 Termíny a definice

Pro účely této normy se používají následující definice:

- **Koeficient délkové teplotní roztažnosti :**
- změna jednotky délky při změně teploty o 1K
- **Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti ve stanoveném teplotním rozmezí:**
- střední přírůstek délky měřeného vzorku vyvolaný zvýšením teplot z nižší na vyšší hranici teploty v daném teplotním rozmezí

3.1.3 Přístroje a pomůcky

Přístroje a pomůcky musejí pro měření splňovat technické parametry, které jsou stanoveny normou ČSN 64-0528.

3.1.3.1 Temperační komora

Temperační komora nebo laboratorní sušárna musí umožnit zvyšování teploty rychlostí nejvýše 1,5 K/min a zabezpečit ohřev měřeného vzorku po celé jeho délce s přesností na 0,2 °C.

Je-li použito k temperaci měřeného vzorku temperační medium, nesmí ovlivňovat vlastnosti zkoušeného plastu.

3.1.3.2 Měřicí a úložný systém

Měřicí a úložný systém musí umožnit sledování délky měřeného vzorku při změně rozměrů v závislosti na teplotě s přesností na $\pm 0,001$ mm. Změny délky zkušebního tělesa se sledují vizuálním způsobem nebo automatickým záznamem. Mechanické zařízení k přenosu změny délky nesmí na měřený vzorek působit tlakem vyšším než 29 kPa.

Koeficient délkové teplotní roztažnosti materiálu, ze kterého je zhotoven měřicí a úložný systém, musí být co nejmenší a musí být známý. Doporučuje se použít

křemenného skla. Není-li použito křemenného skla, musí být provedena korekce na tepelnou roztažnost daného materiálu.

Změna délky zkušebního tělesa se měří s přesností na 1 μm , nestanoví-li materiálová norma nebo dohoda mezi stranami jinak.

3.1.3.3 Zařízení na měření teploty

Zařízení na měření teploty pro stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti musí umožnit měřit teplotu zkušebního vzorku s přesností na 0,1 $^{\circ}\text{C}$.

3.2 Měřicí člen

Jako měřicí člen byl pro měření změny délky měřeného vzorku zvolen digitální úchylkoměr, který splňuje technické parametry pro měření délkové teplotní roztažnosti podle normy ČSN 64-0528.

3.2.1 Digitální úchylkoměr Mitutoyo 543-250B [17]

Digitální úchylkoměr Mitutoyo 543-250B (viz obr. 3.1) umožňuje měřit změnu rozměru měřeného vzorku s přesností na 0,001 mm.

Naměřené hodnoty jednotlivých měření lze pomocí softwaru a převodníku QTREE DUMX1 (viz obr. 3.2) dodaného k digitálnímu úchylkoměru zaznamenávat do PC a vytvořit tak průběh získaných hodnot do grafu. Pomocí těchto hodnot lze vytvořit závislost změny rozměru měřeného vzorku na teplotě a stanovit tak koeficient délkové teplotní roztažnosti v potřebném teplotním rozmezí.

Digitální úchylkoměr Mitutoyo 543-250B vyvozuje při měření velmi malou měřicí sílu, která působí na měřený vzorek a při měření nevyvozuje na měřený vzorek tlak vyšší než 29 kPa (viz kap. 3.10.1.1). Základní technické údaje digitálního úchylkoměru jsou uvedeny v tabulce 3.1.



Obr. 3.2 : Převodník QTREEDUMX1 pro připojení digitálního úchylkoměru Mitutoyo 543-250B k PC

*Tab. 3.1: Technické údaje úchylkoměru
Mitutoyo 543-250B [17]*

Technické parametry Mitutoyo 543-250 B	
Číslicový krok	0,001 mm
Měřicí rozsah	12 mm
Mezní chyba	0,003 mm
Měřicí síla	0,3 – 0,4 N
Hmotnost	190g
LCD display	7-místný
Měřicí dotek	Kulička z tvrdokovu závit M2,5
Napájení	1 baterie SR-44



*Obr. 3.1: Digitální úchylkoměr
Mitutoyo 543-250B*

3.3 Temperační komora

Pro temperaci měřeného vzorku byla vybrána laboratorní sušárna, která je schopna plynulého ohřevu zkušebního tělesa po celé jeho délce.

Laboratorní sušárnu je možno použít nejen jako temperační komoru pro měření délkové teplotní roztažnosti, ale její využití je také pro kondicionaci měřených vzorků, která musí být před každou zkouškou u měřených vzorků provedena.

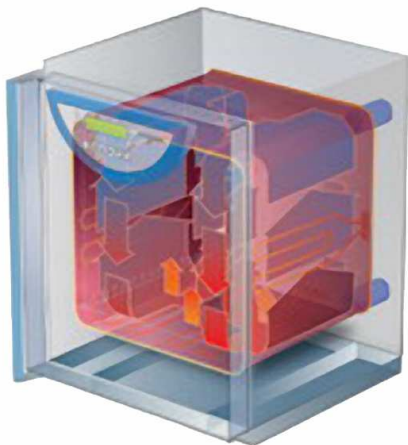
3.3.1 Laboratorní sušárna Ecocell 55 s přirozenou cirkulací vzduchu [18]

Laboratorní sušárna řady Ecocell 55 (viz obr. 3.3) s přirozenou cirkulací vzduchu od firmy BMT a.s, splňuje všechny parametry pro temperaci měřených vzorků, které jsou nutné pro měření délkové teplotní roztažnosti dané normou ČSN 64-0528.

Průběh teploty je řízen moderním mikroprocesorem (Fuzzy-logic) s digitálním displejem a teplotním čidlem Pt 100, které umožňuje přesné zvyšování teploty uvnitř temperační komory rychlostí od 0,1 do 3,2 °C/min až do teploty 250°C. Tato soustava zajišťuje vysokou přesnost regulace teploty a spolehlivosti procesu temperování, která je pro přesné stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti nezbytná.



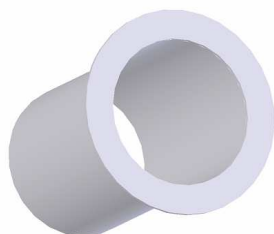
*Obr. 3.3 : Laboratorní
sušárna Ecocell 55*



Laboratorní sušárna Ecocell 55 komfort line s přirozenou cirkulací vzduchu díky patentovanému systému (viz obr. 3.4) zaručuje jemné proudění vzduchu uvnitř celého prostoru temperační komory a zaručuje v každém místě temperační oblasti konstantní nastavenou teplotu.

Obr. 3.4: Laboratorní sušárna Ecocell 55 s patentovanou přirozenou cirkulací vzduchu uvnitř vyhřívané komory.

Pro umístění přípravku na měření délkové teplotní roztažnosti je laboratorní sušárna opatřena průchodkou, která je umístěna uprostřed horní stěny sušárny. Průchodka je kovový válec s límcem (viz obr. 3.5), který spojuje vnitřní prostor temperační komory s vnějším okolím. Vnitřní průměr průchodky je 100 mm a její délka 170 mm, která odpovídá tloušťce stěny temperační komory.



Obr. 3.5: Průchodka laboratorní sušárny Ecocell 55

3.4 Materiálové parametry dilatometru

Pro přesné stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti měřeného vzorku, musejí být při výrobě použity materiály, které mají velmi malý nebo známý koeficient teplotní roztažnosti. Hodnota při měření teplotní roztažnosti měřeného vzorku nesmí být ovlivněna roztažností ostatních materiálů, ze kterých je přípravek zhotoven.

Norma ČSN 64-0528 doporučuje použití křemenného skla, které má oproti plastům zanedbatelnou teplotní roztažnost, jinak musí být provedena korekce na teplotní roztažnost použitého materiálu.

3.4.1 Křemenné sklo

Křemenné sklo je sklo vyrobené z čistého křemene (kysličník křemičitý SiO_2). Oproti běžně používanému sklu, jehož základem je také křemen, ale i další příměsi (nejčastěji sodík a vápník), má křemenné sklo některé odlišné vlastnosti (viz tab. 3.2).

Křemenné sklo má výrazně vyšší teplotu tání (1660°C), než skla příměsová. To je velmi energeticky náročné pro jeho výrobu a je to také hlavním důvodem, proč se při výrobě klasického skla přidávají ke křemenu různé příměsi, které teplotu tání snižují až na teploty kolem 600°C .

Nejčastější použití křemenného skla je v laboratořích, kde pro jeho vysokou tepelnou odolnost, chemickou netečnost a extrémně malou teplotní roztažnost nelze použít jiný materiál stejných vlastností [19].

Velkou nevýhodou křemenného skla je jeho křehkost, která je vyšší než u příměsového skla. Proto výroba složitých tvarů z křemenného skla, které jsou potřeba k přípravkům u komerčně vyráběných dilatometrů je velice náročná a takovéto přípravky jsou vyrobeny na zakázku pro konkrétní dilatometry.

Běžně dostupný polotovár z křemenného skla je křemenná tyč, nebo křemenné trubice o různých průměrech, které se dají pomocí diamantové pily nařezat na potřebné délky.

Z těchto důvodů bylo při konstrukci přípravku pro měření délkové teplotní roztažnosti použito křemenných trubic a křemenné tyčky.

Tab. 3.2: Typické hodnoty vlastností křemenného skla[20]

Hustota	$2,203 \text{ g/cm}^3$
Modul pružnosti	$72 \cdot 10^3 \text{ MPa}$
Teplota tání	1660°C
Koeficient teplotní roztažnosti	$0,55 \cdot 10^{-6} \text{ cm/cm}\cdot\text{K} (20^\circ\text{C} - 320^\circ\text{C})$
Tepelná vodivost	$1,4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$

3.5 Uspořádání přípravku při měření délkové teplotní roztažnosti [21]

Přípravek může mít dvě základní uspořádání (polohy), ve které jsou uloženy měřené vzorky při měření a jsou dnes nejběžnější i u komerčních dilatometrů. Vývoj často přichází s novými, zdánlivě různými konfiguracemi uspořádání, které ale

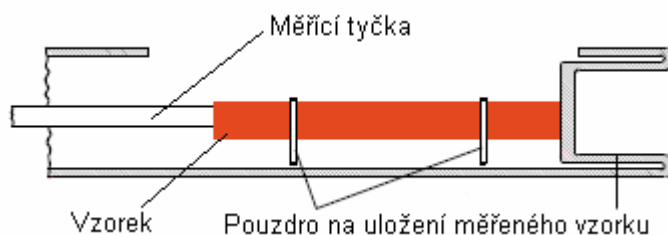
vzhledem ke své složitosti, ceně, nebo potřeby kvalifikované obsluhy nemají své opodstatnění a v běžné praxi se nepoužívají. Dvě základní uspořádání přípravku pro uložení vzorku jsou :

- Horizontální uspořádání přípravku
- Vertikální uspořádání přípravku

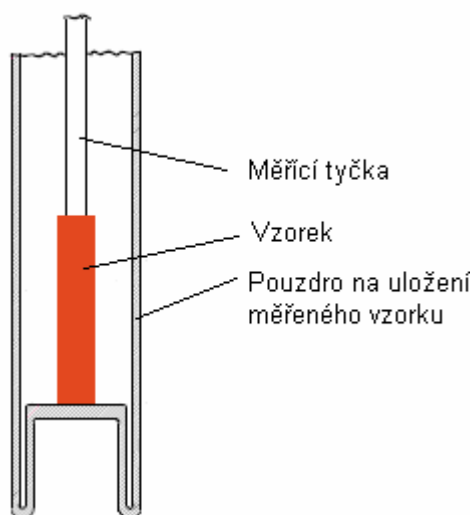
3.5.1 Horizontální uspořádání

Horizontální uspořádání přípravku má měřený vzorek uložený v horizontální poloze. Pro vzorek uložený v horizontální poloze, musí být zajištěno pouzdro na jeho uložení (viz obr. 3.6), které nesmí při měření délkové teplotní roztažnosti omezovat změnu rozměru měřeného vzorku.

Při tomto uspořádání je nutné zajistit konstantní měřicí sílu, kterou působí měřicí tyčka na měřené těleso, jelikož při horizontálním uložení může tření, které působí vedení na měřicí tyčku způsobit nedostatečnou přitlačnou sílu.



3.6: Horizontální uspořádání přípravku a uložení vzorku



Obr. 3.7: Vertikální uspořádání přípravku a uložení vzorku

3.5.2 Vertikální uspořádání

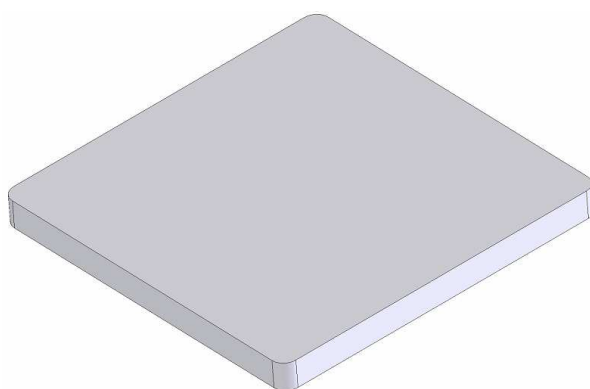
U vertikálního uspořádání odpadá nutnost pouzdra na uložení vzorku, které nesmí omezovat při měření posun měřeného vzorku.

Měřený vzorek je položen ve svislé poloze na desce a konstantní měřicí sílu vytváří samotná tíha měřicí tyčky a měřícího členu (viz obr. 3.7).

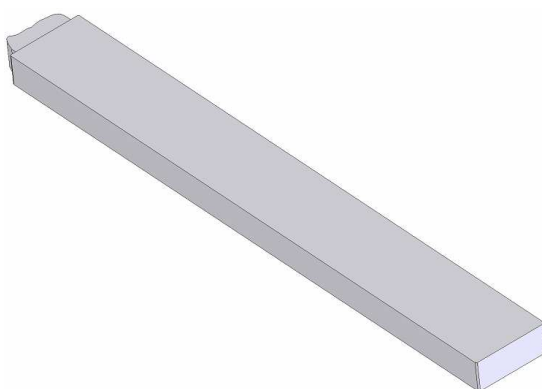
Z těchto důvodů bylo při konstrukci zvoleno vertikální uspořádání přípravku, které umožňuje vyšší kompatibilitu přípravku na rozměry měřených vzorků.

3.6 Rozměry měřených vzorků

Přípravek pro měření délkové teplotní roztažnosti byl navržen pro měření vzorků o délkách 50 a 80 mm. Odzkoušení bylo provedeno na 2 typech měřených vzorcích (viz obr. 3.8).



a)



b)

Obr. 3.8 : Měřené vzorky pro stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti

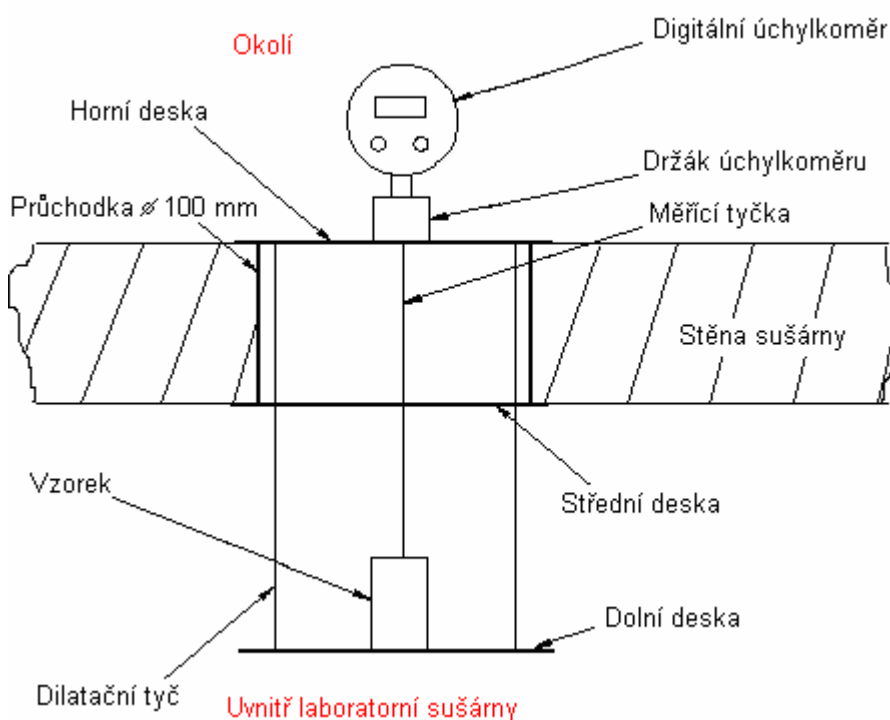
a) Deska o rozměrech 50x50x4 mm

b) Hranol 80x10x4 mm

3.7 Schematický návrh přípravku pro měření délkové teplotní roztažnosti

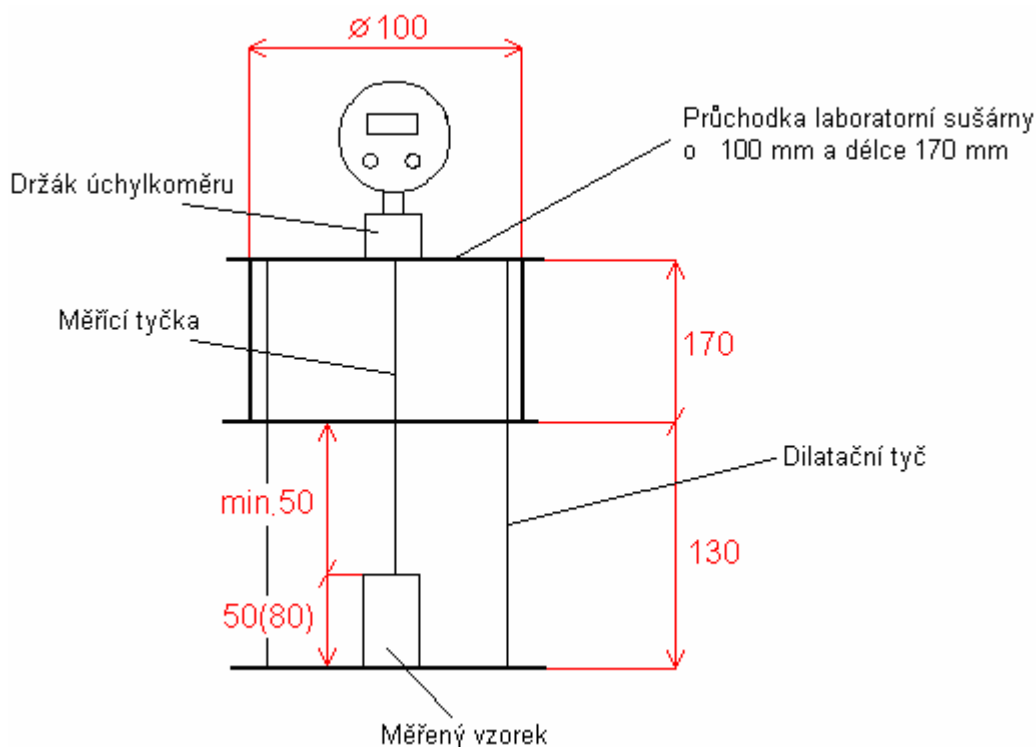
Schematický návrh zobrazuje umístění přípravku v průchodce laboratorní sušárny a hlavní funkční části přípravku, které budou použity při konečném návrhu a konstrukci (viz obr. 3.9).

Přípravek se skládá z horní, dolní a střední desky, které tvoří „rám“ přípravku a ostatních částí, jako je dilatační tyč a měřicí tyčka, které tvoří funkční části přípravku.



Obr. 3.9 : Schematický návrh přípravku umístěného v laboratorní sušárně

Hlavní rozměry přípravku, jsou dány velikostí průchodky laboratorní sušárny a velikostí měřených vzorků. Od těchto pevných rozměrů jsou stanoveny velikosti hlavních funkčních částí přípravku, jako jsou dilatační tyče, měřicí tyčka a držák úchylkoměru. Minimální vzdálenost, která je od měřeného vzorku k průchodce je stanovena 50 mm (viz obr. 3.10). Je to z důvodu dostatečného prostoru pro proudění vzduchu v laboratorní sušárně kolem měřeného vzorku a pro lepší manipulaci při vkládání vzorku do přípravku.



Obr. 3.10: Hlavní pevné rozměry pro konstrukci přípravku

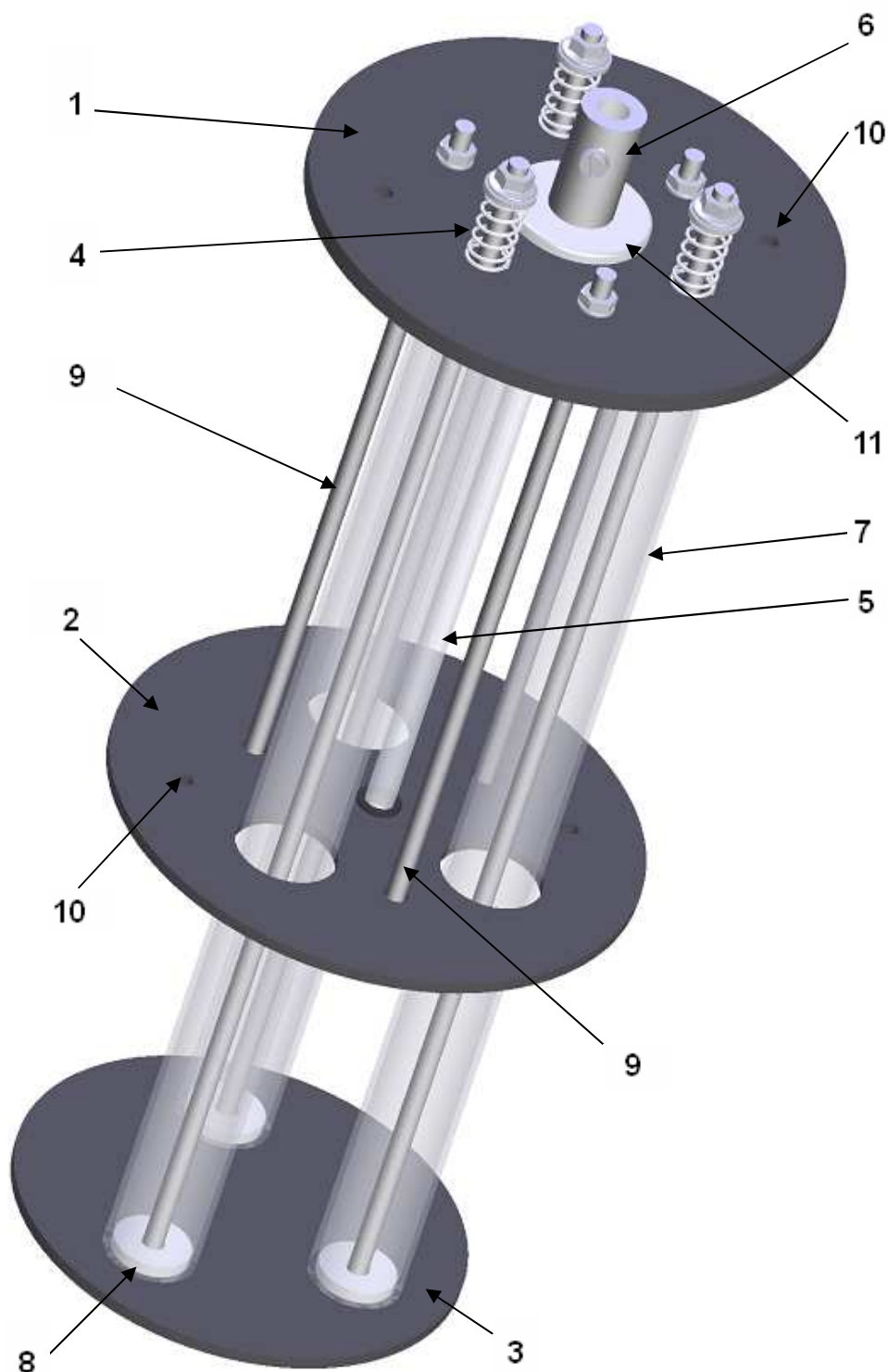
3.8 Návrh modelu přípravku v softwaru Solid Works 2006

Návrh 3D modelu v softwaru Solid Works 2006 je vytvořený podle skutečných rozměrů a zobrazuje všechny funkční části přípravku, které budou u skutečného zkonstruovaného přípravku pro měření délkové teplotní roztažnosti.

Vytvořený 3D model přípravku umožnil před vlastní konstrukcí lepší představu o umístění jednotlivých částí a funkčních prvků přípravku.

Teprve po tomto 3D návrhu přípravku, který byl odzkoušen pro instalaci do průchodky laboratorní sušárny a na uložení obou měřených vzorků, byly vytvořeny výrobní výkresy a sestava, podle kterých se vyrobila přesná kopie tohoto 3D návrhu přípravku pro měření délkové teplotní roztažnosti.

Vymodelovaný 3D návrh s reálnými rozměry a jeho finální podoba se všemi funkčními částmi je na obr 3.11.



Obr. 3.11: Finální 3D model přípravku pro měření délkové teplotní roztažnosti

- 1.Horní deska, 2. Střední deska, 3.Dolní deska, 4.Pružiny, 5.Měřicí tyčka
6.Držák na úchylkoměr, 7. Dilatační trubice, 8.Středící kroužky, 9.Závitové tyče,
10.Otvor pro přivedení drátového termočlánku, 11. Nastavovací podložka

1. Horní deska

Horní deska je základní nosnou deskou přípravku, na kterou jsou uchyceny ostatní části přípravku. Je tvořena 9-ti otvory. Šest otvorů je pro závitové tyče, které spojují mezi sebou jednotlivé desky, přičemž na třech z nich jsou umístěny pružiny, které vytváří pružné spojení mezi horní a dolní deskou (viz kap. 3.9). Otvor ve středu desky je opatřen závitem, který je pro zašroubování držáku na digitální úchylkoměr a jeho pevného spojení s horní deskou. Dva malé otvory po stranách jsou pro přivedení termočlánku.

2. Střední deska

Střední deska je spojená spolu s horní deskou třemi závitovými tyčemi a při umístění v průchodce laboratorní sušárny tvoří „zátku“, která uzavírá prostor mezi vnitřní komorou laboratorní sušárny a okolím. Zároveň je v ní otvor pro vedení měřicí tyčky a tři otvory pro vedení dilatačních trubic, které vedou mezi horní a dolní deskou. Dva malé otvory jsou stejné jako na horní desce a jsou pro přivedení termočlánku.

3. Dolní deska

Dolní deska je poslední část přípravku, která tvoří plochu pro umístění měřeného vzorku. Dolní deska je spojená třemi závitovými tyčemi s horní deskou pomocí pružin, které vytváří jejich pružné spojení (viz kap. 3.9).

4. Pružiny

Pružiny zajišťují pružné spojení mezi horní a dolní deskou a při měření absorbují teplotní roztažnost závitových tyčí. Princip je blíže popsán v kapitole 3.9.

5. Měřicí tyčka

Měřicí tyčka, která je z křemenného skla přenáší změnu rozměru zkoušeného vzorku na digitální úchylkoměr. Při měření délkové teplotní roztažnosti plastu nesmí měřicí tyčka vlivem své vlastní teplotní roztažnosti vnášet chyby do měření, proto je z křemenného skla (viz kap. 3.4.1). Jeden konec měřicí tyčky je při měření v kontaktu s měřeným vzorkem a druhý konec je v kontaktu s měřícím dotykem digitálního úchylkoměru. Měřicí tyčka je opatřena silikonovým kroužkem, který

zajišťuje, aby při odebrání měřeného vzorku nespadla měřicí tyčka na dolní desku a nedošlo k zničení měřicí tyčky (viz kap. 3.10.1).

6. Držák úchylkoměru

Držák úchylkoměru je pevně uchycen pomocí závitu na horní desce a je opatřen šroubem, který fixuje polohu umístěného digitálního úchylkoměru proti posunutí.

7. Dilatační trubice

Dilatační trubice jsou umístěny mezi horní a dolní deskou a zajišťují mezi nimi konstantní vzdálenost při rostoucí, nebo klesající teplotě. Dilatační tyče jsou stěžejní částí dilatometru, které jsou nezbytné pro zajištění přesného měření teplotní roztažnosti měřeného vzorku (viz kap. 3.9).

Dilatační tyče jsou trubice z křemenného skla, jejichž rozměrová stabilita je v rozmezí od 20 do 320 °C téměř konstantní a v porovnání s teplotní roztažností plastů je zanedbatelná. Tím je dána konstantní vzdálenost mezi horní a dolní deskou a změna rozměru vlivem teploty, která je přenášena měřicí tyčkou na digitální úchylkoměr je pouze od měřeného vzorku.

8. Středící kroužky

Středící kroužky jsou nasazené na závitové tyči. Jejich funkcí je vystředit při montáži přípravku do laboratorní sušárny dilatační trubice s osou závitové tyče.

9. Závitové tyče

Závitové tyče spojují mezi sebou jednotlivé desky a drží tak celý přípravek jako jeden celek.

10. Průchozí otvory

Průchozí otvory jsou na horní a střední desce. Jsou to otvory, kterými je možno zavést z vnějšího okolí do prostoru laboratorní sušárny termočlánek, nebo případně jinou sondu.

11. Nastavovací podložka

Nastavovací podložka je pro nastavení vzdálenosti držáku úchylkoměru od horní desky a tím možnost regulace měřené vzdálenosti od vzorku a digitálního úchylkoměru.

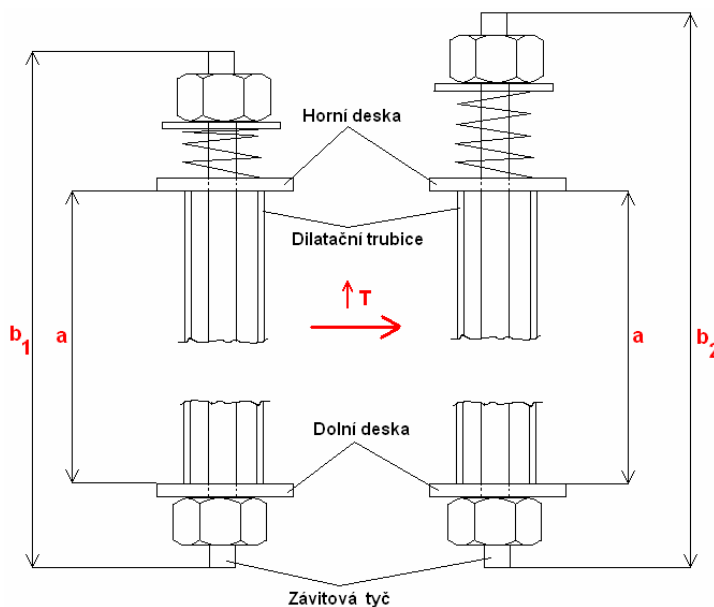
3.9 Funkční princip přípravku

Při ohřátí části přípravku (mezi střední a dolní deskou), která je uvnitř laboratorní sušárny na vyšší teplotu, se všechny její části vlivem své teplotní roztažnosti začnou rozpínat. Pro přesné stanovení koeficientu délkové teplotní roztažnosti měřeného vzorku, musí být zajištěna mezi dolní deskou, na které je umístěn měřený vzorek a držákem úchylkoměru konstantní vzdálenost.

Toho je docíleno pomocí dilatačních trubíc, které jsou umístěny mezi dolní a horní deskou. Dilatační trubice jsou z křemenného skla (viz kap. 3.4.1), které má oproti plastům zanedbatelnou teplotní roztažnost a při zahřátí se délka dilatačních trubíc zvýší o nepatrnou délku změnu, kterou je možno považovat za konstantní a zanedbat ji.

Spojení mezi horní a dolní deskou je zajištěno závitovými tyčemi z oceli, které jsou umístěny uvnitř dilatačních trubíc. Při ohřevu se závitové tyče roztáhnou více než dilatační trubice z křemenného skla a při pevném spojení horní a dolní desky závitovými tyčemi, by tak při zvýšené teplotě došlo k jejich roztahnutí, které by bylo větší než u dilatačních trubíc a vzdálenost mezi horní a dolní deskou by nebyla dodržena konstantní.

K tomu, aby byl zaručen stálý kontakt dilatačních trubíc s horní a dolní deskou a tím



Obr. 3.12: Princip absorpce teplotní roztažnosti závitové tyče do pružiny.

a- vzdálenost mezi horní a dolní deskou

b₁- délka závitové tyče před ohřevem

b₂-délka závitové tyče po ohřevu

zajištěna konstantní vzdálenost mezi deskami, musí být teplotní roztažnost závitových tyčí, které spojují horní a dolní desku kompenzována. To je zajištěno pružinami, které vytváří pružné spojení horní a dolní desky a při zvýšení teploty se teplotní roztažnost závitové tyče absorbuje do pružiny, která se roztáhne a vzdálenost mezi horní a dolní deskou zůstane zachována konstantní (viz obr.3.12).

3.10 Výroba jednotlivých částí přípravku

Jednotlivé části ze kterých je přípravek pro měření délkové teplotní roztažnosti sestaven, jsou vyrobeny podle výrobních výkresů a přiložené výrobní sestavy v příloze IV.

- Horní deska
- Dolní deska
- Střední deska
- Držák úchylkoměru
- Středící kroužky

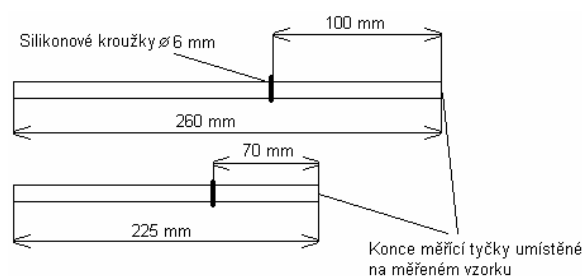
Fotografie a 3D model zkonstruovaného přípravku jsou v příloze III.

3.10.1 Výroba měřicí tyčky a dilatačních trubic

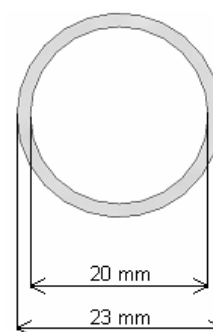
Měřicí tyčka a dilatační trubice jsou zhotoveny z polotovaru z křemenného skla (viz kap. 3.4.1). Délka jedné dilatační trubice je 300mm. Její konce musí být tepelně opracovány pro snížení křehkosti. Profil dilatační trubice je zakótován na obr. 3.13.

Měřicí tyčky jsou vyrobeny dvě. Pro měření vzorků o délce 50 mm je měřicí tyčka dlouhá 260 mm a pro měření vzorků délky 80 mm je dlouhá 225 mm. U obou měřicích tyček jsou jejich konce rovné a mají průměr 7 mm.

Umístění silikonových kroužků na měřicích tyčkách, které mají průměr 6mm jsou zakótovány na obr. 3.14.



Obr. 3.14: Umístění silikonových kroužků na měřicích tyčkách



Obr.3.13: Profil dilatační trubice

3.10.1.1 Tlak na vzorek od měřicí tyčky

Hmotnost měřicí tyčky dlouhé 260 mm je 17g. Vlastní tíha měřicí tyčky je tedy 0,17 N a touto silou působí měřicí tyčka na měřené těleso. Po usazení digitálního úchylkoměru do přípravku se k této tíze měřicí tyčky přičte ještě měřicí síla, kterou vyvozuje digitální úchylkoměr, která je 0,4N.

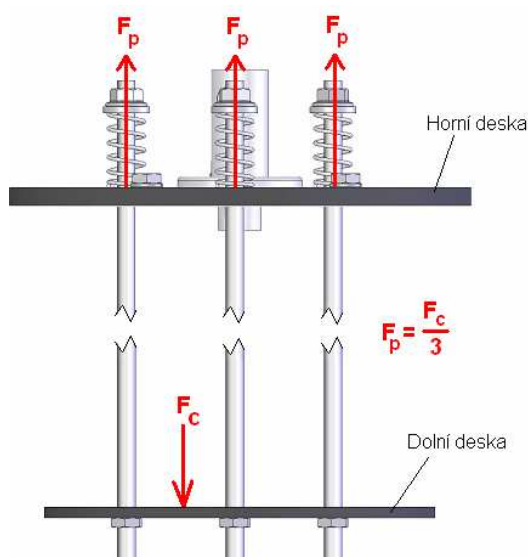
Celková síla, která působí na měřený vzorek při použití tyčky o délce 260 mm a použití digitálního úchylkoměru Mitutoyo 543-250B je tedy maximálně 0,57 N. Při průměru měřicí tyčky 7 mm a síle 0,57 N je na vzorek (viz kap. 3.6) vyvozen tlak od měřicí soustavy maximálně 22 kPa. Tímto je splněna podmínka podle normy ČSN 64-0528, která udává, že na měřené těleso nesmí od zařízení k přenosu změny délky působit vyšší tlak než 29 kPa.

3.10.2 Výroba pružiny

Pro správnou funkci přípravku, musejí pružiny v napjatém stavu vyvinout takovou sílu, která přidrží dolní desku s dilatačními trubicemi k horní desce.

Celková síla F_C , která je vyvozena vlastní tíhou jednotlivých členů přípravku je předimenzována (pro hmotnost měřeného vzorku 500 g) a stanovena na hodnotu 8N. Od této síly je odvozena minimální síla pružiny F_P , kterou musí zvolená pružina vyvozovat, aby udržela dolní desku přidrženu k horní desce (viz obr. 3.15).

Pro správnou funkci přípravku musí ovšem síla, kterou pružina vyvozuje být mnohem vyšší, aby byl vyvozen tlak na dilatační trubice od horní a dolní desky. Vyhovující parametry pružiny pro konstrukci přípravku a jeho správnou funkci byly zvoleny parametry uvedené v tab. 3.3.

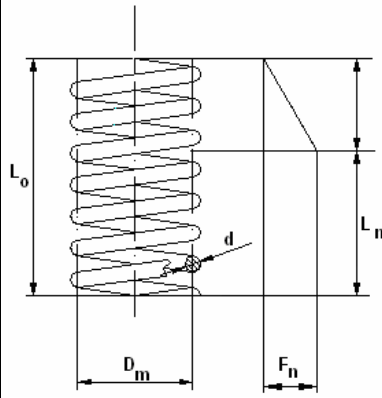


Obr. 3.15: Síly působící na pružiny v napjatém stavu.

F_C – Síla, kterou vyvozuje tíha dolní desky a části přípravku včetně měřeného vzorku

F_P – minimální síla pružiny

Tab. 3.3: Technické parametry tlačné pružiny

L_n	7 mm	
L_o	20 mm	
D_m	10 mm	
d	0,8 mm	
F_n	15 N	
c	1,2N/mm	

F_n ... max.síla vyvinutá pružinou

L_o ...délka pružiny v nezatíženém stavu

D_m ...střední průměr pružiny

d ...tloušťka drátu

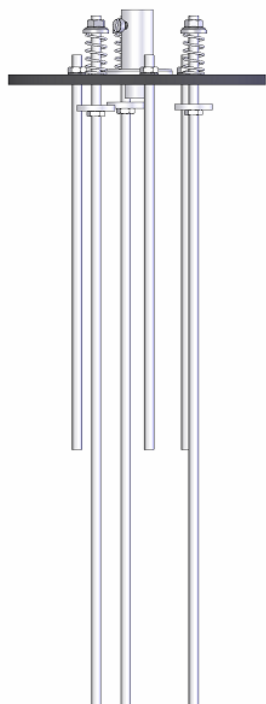
L_n ...přípustné stlačení pružiny

c ...tuhost pružiny

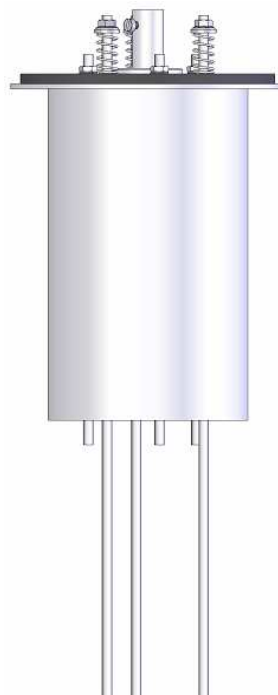
3.11 Montáž přípravku do laboratorní sušárny

Montáž přípravku do laboratorní sušárny se provede ve čtyřech krocích:

1. Sestavení základní části, která se skládá z horní desky, závitových tyčí s matkami a podložkami, držáku úchylkoměru, pružin s matkami a podložkami, středících kroužků a nastavovací podložky (viz obr. 3.16).
2. Uložení základní sestavy do průchodky laboratorní sušárny (viz obr. 3.17).
3. Na delší závitové tyče se nasadí dolní a střední deska, středící podložky a dilatační trubice (viz obr. 3.18).
4. Do středu střední desky se nasadí měřicí tyčka a celá střední deska se připevní maticemi ke dnu průchodky laboratorní sušárny. Matice které jsou na pružinách se dotáhnou tak, aby se pružiny stlačily o 1/3 své délky a vytvořily tak dostatečnou sílu na spojení mezi horní a dolní deskou.(viz obr. 3.19).



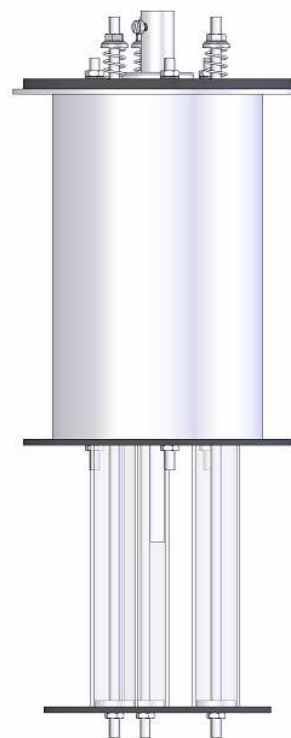
Obr. 3.16: Sestavená základní část přípravku



Obr. 3.17: Základní část uložená v průchodce laboratorní sušárny



Obr. 3.18: Nasazená dolní a střední deska se středícími kroužky a dilatačními trubicemi

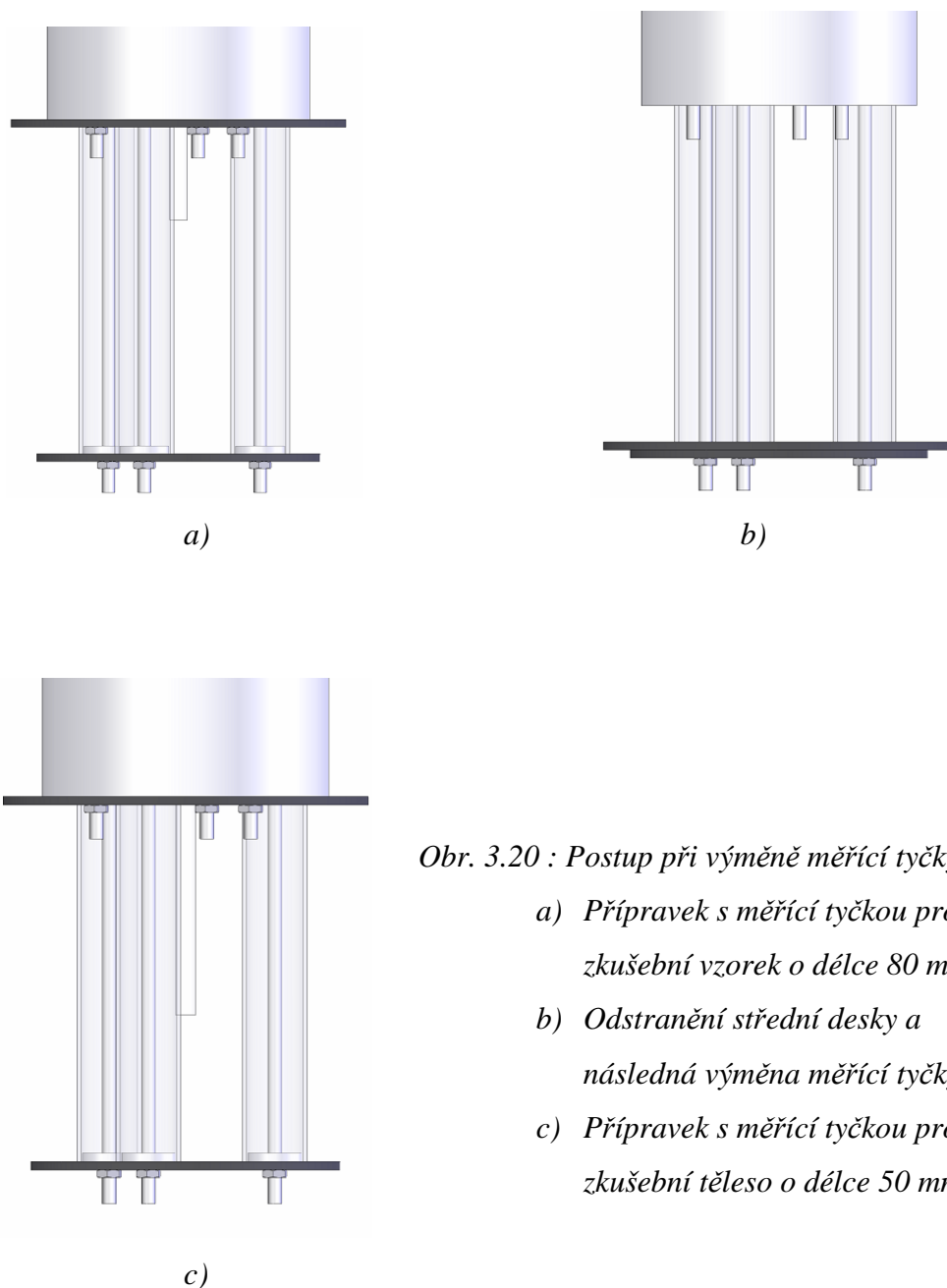


Obr. 3.19: Konečná sestava přípravku uložená v laboratorní sušárně

3.12 Výměna měřicí tyčky

Pro měření vzorku o délce 50 mm se musí použít měřicí tyčka o délce 260 mm. Při měření vzorku o délce 80 mm, musí být měřicí tyčka vyměněna za kratší měřicí tyčku o délce 230 mm.

Při výměně měřicí tyčky se povolí matice, které přidržují střední desku k průchodce. Po uvolnění matic se střední deska položí se na dolní desku. Tím se otevře prostor uvnitř průchodky laboratorní sušárny a měřicí tyčku je možno vyjmout a vyměnit jí. Zpětným postupem se střední deska dá zpět a tím uzavře průchodku. (viz obr. 3.20)



Obr. 3.20 : Postup při výměně měřicí tyčky

- a) Přípravek s měřicí tyčkou pro zkušební vzorek o délce 80 mm
- b) Odstranění střední desky a následná výměna měřicí tyčky
- c) Přípravek s měřicí tyčkou pro zkušební těleso o délce 50 mm

3.13 Odzkoušení přípravku

Pro odzkoušení přípravku byly změřeny a vyhodnoceny tři plastové vzorky z různých polymerních materiálů, kde u dvou materiálů je známá hodnota koeficientu teplotní roztažnosti a jeden ocelový vzorek.

Teplotní rozsah pro vyhodnocení koeficientu délkové teplotní roztažnosti u plastových vzorků byl zvolen pro teploty $+40^{\circ}\text{C}$ až $+60^{\circ}\text{C}$ a dále pro $+60^{\circ}\text{C}$ až pro $+80^{\circ}\text{C}$. Pro měření ocelového vzorku byl nastaven teplotní obsah od $+30$ do $+185^{\circ}\text{C}$.

Měření bylo provedeno u každého materiálu na 3 vzorcích (mimo ocelového vzorku), kde jejich výsledná hodnota byla zprůměrována a zapsána směrodatná odchylka z výsledných hodnot 3 vzorků.

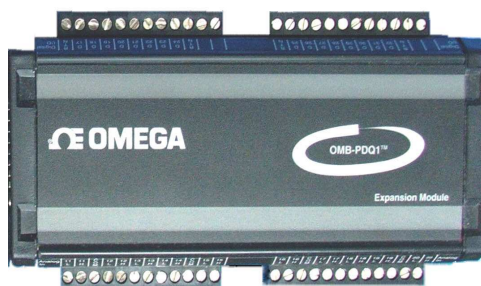
Termočlánek pro měření teploty vzorku:

Pro stanovení koeficientu teplotní roztažnosti je potřeba znát přesnou hodnotu teploty měřeného vzorku a pro vykreslení jejího průběhu i záznam dat. Volba měřicího termočlánu je volbou obsluhy přípravku, ale musí splňovat parametry dané normou ČSN 64-0528, která stanovuje zařízení na měření teploty s přesností na $0,1^{\circ}\text{C}$.

Pro odzkoušení přípravku bylo použito drátkového termočlánu typu „K“ (viz obr. 3.21) s měřicí kartou DaqPCMCIA (viz obr. 3.22), která umožňuje záznam naměřených hodnot do PC a splňuje parametry pro měření dané normou ČSN 64-0528.



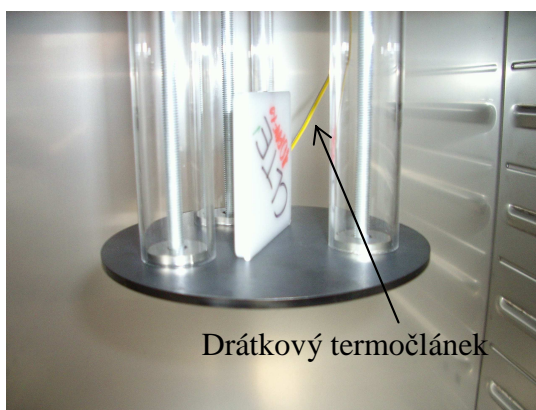
*Obr. 3.21: Drátkový termočlánek
typu „K“*



*Obr. 3.22: Sběrnice dat OMB-
DAQ-56*

Nastavení měřicího systému:

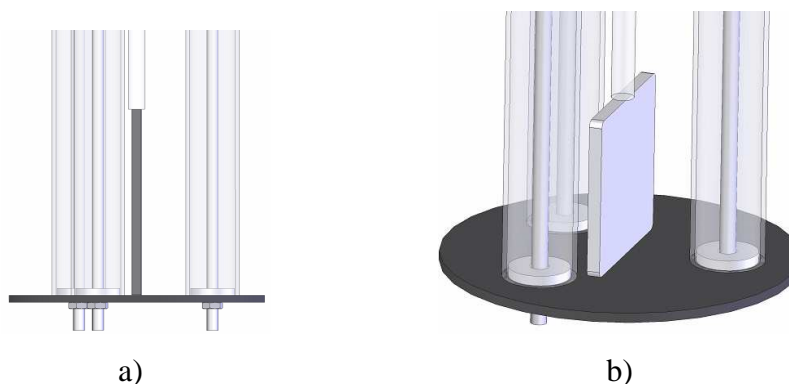
1. Nastavení měřicího teplotního rozsahu na laboratorní sušárně nastavením příslušného teplotního programu, který je popsán v návodu laboratorní sušárny Ecocell 55 [8].
2. Připojení digitálního úchylkoměru Mitutoyo 543-250B datovým kabelem k počítači po záznam naměřených dat měřeného vzorku [17,22].
3. Uložení termočlánu na měřený vzorek podle normy ČSN 64-0528 (viz obr. 3.23) a připojení termočlánu ke sběrnici DaqPCMCIA (viz obr. 3.22) pro záznam dat do počítače.



Obr. 3.22: Umístění termočlánu na měřeném vzorku

Před začátkem měření musejí být čelní plochy zkušebního tělesa kolmé k jeho podélné straně, tak aby při jeho položení na dolní desku vzorek stál samovolně ve svislé poloze.

Zkušební těleso musí být umístěno v přípravku tak, aby měřicí tyčka byla ve středu měřeného tělesa (viz obr. 3.24).



Obr. 3.24: Umístění měřeného vzorku v přípravku

a) umístěný měřený vzorek 80x10x4 mm (viz kap. 3.6)

b) umístěný měřený vzorek 50x50x4 mm (viz kap. 3.6)

Umístěný přípravek v laboratorní sušárně s uloženým měřeným vzorkem připravený k měření je na obrázku 3.25.



a)

Obr. 3.25: Přípravek uložený v laboratorní sušárně připravený k měření.

a) Pohled na přípravek z vnějšku

b) Pohled na přípravek uvnitř laboratorní sušárny



b)

Po spuštění ohřevu měřeného vzorku na laboratorní sušárně se spustí záznam měřených hodnot u měřicí karty DaqPCMCIA s termočlánkem, která snímá teplotu měřeného vzorku a zároveň se spustí záznam dat z digitálního úchylkoměru. Tyto hodnoty se ukládají do souboru, kde je výsledkem soubor dat s naměřenými teplotami a hodnotami změny délky měřeného vzorku, které jsou potřeba pro konečný výpočet koeficientu délkové teplotní roztažnosti podle vzorce (8) (viz kap.2.8.4).

3.14 Výsledky měření a jejich diskuze

Naměřené hodnoty koeficientů délkové teplotní roztažnosti jsou měřeny podle normy ČSN 64-0528.

Zaznamenané data z digitálního úchylkoměru a měřicí karty s termočlánkem z jednotlivých měření, ze kterých jsou vyhodnoceny koeficienty délkové teplotní roztažnosti jsou uloženy do tabulek, které jsou uvedeny v příloze II.

Průběhy změny rozměru měřených vzorků v závislosti na teplotě jsou zobrazeny v grafech v příloze I.

Hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti měřených vzorků uvedených v materiálových listech:

Polypropylen PP108MF10 [23]

$\alpha = 120 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ (od -30 do $+30^\circ\text{C}$) ve směru toku

PP/PS Elan Xp 515 [24]

- hodnota koeficientu teplotní roztažnosti není známa

Polyoxymethylen POM Delrin 900P NC10 [25]

$\alpha = 120 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ (od 40 do 60°C) ve směru toku [25]

$\alpha = 140 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ (od 60 do 105°C) ve směru toku [25]

Ocel [26]

$12 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ (při 20°C) [26]

3.14.1 Polypropylen PP108MF10

Tab. 3.4: Výsledné naměřené hodnoty středního koeficientu délkové teplotní roztažnosti u materiálu polypropylen PP108MF10 měřeného kolmo na směr toku

Měřený vzorek	Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti	
	$\alpha_{40-60^\circ\text{C}}$	$\alpha_{60-80^\circ\text{C}}$
1	$138 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$143 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
2	$137 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$148 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
3	$140 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$147 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Průměrná hodnota a směrodatná odchylka	$\alpha = (138 \pm 1,24) \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$\alpha = (146,10 \pm 2,16) \cdot 10^{-6} / \text{K}$

Tab. 3.5: Výsledné naměřené hodnoty středního koeficientu délkové teplotní roztažnosti u materiálu polypropylen PP108MF10 měřeného ve směru toku

Měřený vzorek	Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti	
	$\alpha_{40-60^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_{60-80^{\circ}\text{C}}$
1	$128 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$144 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
2	$126 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$138 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
3	$128 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$142 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Průměrná hodnota a směrodatná odchylka	$\alpha = (127 \pm 0,94) \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$\alpha = (141 \pm 2,4) \cdot 10^{-6} / \text{K}$

Diskuze

Hodnoty koeficientu délkové teplotní roztažnosti pro polypropylen PP108MF10 jsou v materiálovém listu [23] uvedeny pro jiný teplotní rozsah, který není možné v laboratorní sušárně Ecocell 55 dosáhnout. Nicméně výsledné naměřené hodnoty, odpovídají teoretickému nárůstu koeficientu pro zvolený teplotní rozsah 40 až 80°C.

Hodnoty naměřené ve směru toku (viz tab. 3.5) a ve směru kolmém na tok taveniny (viz tab. 3.4) jsou téměř totožné. Je to způsobeno složením materiálu, který obsahuje mikrotalek a ten způsobuje menší anizotropii teplotní roztažnosti materiálu.

3.14.2 PP/PS Elan XP 515

Tab. 3.6: Výsledné naměřené hodnoty středního koeficientu délkové teplotní roztažnosti u materiálu PP/PS Elan XP 515 měřeného ve směru toku.

Měřený vzorek	Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti	
	$\alpha_{40-60^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_{60-80^{\circ}\text{C}}$
1	$100 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$114 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
2	$102 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$119 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
3	$105 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$120 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Průměrná hodnota a směrodatná odchylka	$\alpha = (102 \pm 2,1) \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$\alpha = (118 \pm 2,6) \cdot 10^{-6} / \text{K}$

Tab. 3.7: Výsledné naměřené hodnoty středního koeficientu délkové teplotní roztažnosti u materiálu PP/PS Elan XP 515 měřeného kolmo na směr toku.

Měřený vzorek	Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti	
	$\alpha_{40-60^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_{60-80^{\circ}\text{C}}$
1	$95 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$160 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
2	$105 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$156 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
3	$93 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$157 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Průměrná hodnota a směrodatná odchylka	$\alpha = (97 \pm 5,2) \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$\alpha = (158 \pm 1,7) \cdot 10^{-6} / \text{K}$

Diskuze

Hodnota koeficientu teplotní roztažnosti PP/PS Elan XP 515 není uvedena v materiálovém listu a naměřené hodnoty nemohou být proto porovnány. Velká skoková změna koeficientu teplotní roztažnosti mezi teplotním rozsahem 40 až 60°C a 60 až 80°C při měření kolmo na směr toku (viz tab. 3.7) je způsobena přechodovou teplotou, která je 65 °C [24]. Výsledná hodnota měřená ve směru toku (viz tab. 3.6) je nižší než ve směru kolmém a je to způsobeno anizotropií teplotní roztažnosti materiálu.

3.14.3 Polyoxymethylen POM Delrin 900P NC10

Tab. 3.8: Výsledné naměřené hodnoty středního koeficientu délkové teplotní roztažnosti u materiálu polyoxymethylen POM Delrin 900P NC10 měřeného ve směru toku.

Měřený vzorek	Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti	
	$\alpha_{40-60^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_{60-80^{\circ}\text{C}}$
1	$118 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$126 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
2	$114 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$124 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
3	$115 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$125 \cdot 10^{-6} / \text{K}$
Průměrná hodnota a směrodatná odchylka	$\alpha = (116 \pm 1,69) \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$\alpha = (125 \pm 0,8) \cdot 10^{-6} / \text{K}$

Diskuze

Výsledná hodnota koeficientu teplotní roztažnosti (viz tab. 3.8) poly-oxymethylenu POM Delrin 900P NC10, který je měřen ve směru toku téměř odpovídá hodnotě uvedené v materiálovém listu pro teplotní rozsah (40 až 60°C). Výsledná naměřená hodnota pro vyšší teplotní rozsah (60 až 80°C) je nepatrně vyšší a koresponduje s materiálovou hodnotou koeficientu teplotní roztažnosti [25].

3.14.4 Ocelový vzorek

Tab. 3.9: Výsledné naměřené hodnoty středního koeficientu délkové teplotní roztažnosti u ocelového vzorku

Měřený vzorek	Střední koeficient délkové teplotní roztažnosti	
	$\alpha_{30-120^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_{120-180^{\circ}\text{C}}$
1	$\alpha = 12,8 \cdot 10^{-6} / \text{K}$	$\alpha = 13,5 \cdot 10^{-6} / \text{K}$

Diskuze

Hodnota středního koeficientu délkové teplotní roztažnosti pro běžnou ocel je $12 \cdot 10^{-6} / \text{K}$ při 20°C [26]. Výsledná hodnota koeficientu teplotní roztažnosti ocelového vzorku (viz tab. 3.9), je odpovídající udávané hodnotě běžných ocelí.

Z grafu závislosti změny rozměru měřeného vzorku na teplotě uvedeného v příloze I. na obrázku 1.16 je patrné že nárůst koeficientu s rostoucí teplotou je velmi pozvolný a patrný až na větším rozsahu teplot.

4. Závěr

Cílem diplomové práce byla konstrukce přípravku pro měření teplotní roztažnosti, který bude schopný změřit a vyhodnotit koeficient teplotní roztažnosti jakéhokoliv plastu.

Hlavním funkčním prvkem navrženého přípravku je křemenné sklo, od kterého se celý návrh a měřicí systém přípravku odvíjel a před vlastní konstrukcí byla jeho funkce teoreticky popsána. Pro ověření funkčnosti byl přípravek odzkoušen na vybraných plastových vzorcích, kde výsledky měření potvrdily jeho funkci a výsledné hodnoty se blížily k hodnotám uváděných v materiálových listech daných plastů. Směrodatná odchylka výsledné hodnoty koeficientu teplotní roztažnosti u všech plastových vzorků je poměrně malá, což značí o schopnosti přípravku opakovat jednotlivá měření se stejnou přesností.

Přípravek byl navržen pro měření teplotní roztažnosti plastů, ale jeho schopnost měřit i menší hodnoty teplotní roztažnosti byla odzkoušena na ocelovém vzorku, který má oproti plastům o řád nižší teplotní roztažnost. Výsledné naměřené hodnoty opět potvrdily téměř totožné výsledky koeficientu teplotní roztažnosti měřené oceli s hodnotami, které jsou obecně pro ocel udávány.

Z konstrukčního a principiálního hlediska je přípravek vzhledem k možnosti záznamu dat změny rozměru použít také pro měření smrštění, kdy se měřený vzorek umístí do přípravku a spuštěný záznam dat může i za delší časový průběh zobrazit hodnotu smrštění.

Pro konečné zhodnocení a představě o jaké přesnosti měření je přípravek schopný vyhodnocovat výsledky je nutné do budoucna odzkoušet více různých vzorků o známém koeficientu teplotní roztažnosti. Také je ale nutno brát v potaz, že hodnoty koeficientů teplotní roztažnosti v materiálových listech nejsou absolutní a jejich hodnota nemusí přesně odpovídat naměřeným hodnotám na přípravku.

Seznam použité literatury

- [1] KREBS, J.: Teorie zpracování nekovových materiálů. Technická univerzita v Liberci. Vydání druhé. Liberec. 2001. ISBN 80-7083-449-8
- [2] <http://www.britannica.com> (Leden 2007)
- [3] LENFELD, P.: Výuková prezentace k předmětu Technologie II.
- [4] SOVA, A., KREBS, J. A KOL.: Termoplasty v praxi, Nakladatelství Verlag Dashöfer Praha, 1999-2004
- [5] LENFELD, P.: Technologie II.- za podpory projektu FRVŠ 1998/2005
(Internetová podpora výuky technologie tváření kovů a plastů)
- [6] BĚHÁLEK, L.: Hodnocení nadmolekulární struktury plastů - za podpory projektu In-TECH (reg.č. CZ.04.1.03/3.2.15.2/0215) Evropského sociálního fondu (ESF projekt v Opatření 3.2)
- [7] KREBSOVÁ, M.: Nauka o polymerech. Vysoká škola strojní a textilní v Liberci. Vydání první. Liberec 1978.
- [8] ECOCELL 55, Návod k použití laboratorní sušárny linie komfort, LSI_K_np_cz 0608_V1.14
- [9] BAKULE, K., FORTELNÝ, I.: Základy fyziky polymerů, 2.díl, ÚMCH ČSAV, Praha 1988, 231s
- [10] GOYAL, R.K., TIWARI, A.N., MULIK, U.P.: Anisotropic linear thermal expansion of poly(ether-ether-ketone), European Polymer Journal, Volume 42, Issue 10, October 2006
- [11] KUČERA, L.: Anisotropie teplotní roztažnosti kompozitů uhlík-uhlík /Diplomová práce/. Technická univerzita v Liberci 1997
- [12] KUBIČKA, V.: Vliv podmínek vstřikování na výrobní smrštění termoplastů /Diplomová práce/. Technická univerzita v Liberci 1999
- [13] TEZVERGIL, A.: The effect of Fiber orientation on the thermal coefficient of fiber-reinforced composites, European Polymer Journal, Volume 19, Issue 6, Pages 471-477
- [14] <http://www.baehr-thermo.de/> (Listopad 2006)
- [15] <http://us.mt.com/> (Listopad 2006)
- [16] <http://www.evitherm.org/default.asp?ID=249> (Únor 2007)
- [17] Firemní materiály a katalogy [Mitutoyo]

- [18] www.bmt.cz (Říjen 2006)
- [19] <http://cs.wikipedia.org/> (Leden 2007)
- [20] <http://www.redoptronics.com/fused-silica-optical-material.html> (Leden 2007)
- [21] <http://www.anter.com/TN69.htm#DILATOMETER> (Leden 2007)
- [22] <http://www.trestik.cz/view.php?cislocclanku=2005012605> (Březen 2007)
- [23] Materiálový list PP108MF10
- [24] Materiálový list PP/PS Elan Xp 515
- [25] Materiálový list POM Delrin 900P NC10
- [26] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/thexp.html> (Březen 2007)

Seznam příloh

Příloha I.: Grafy naměřených hodnot

Příloha II.: Tabulky naměřených hodnot

Příloha III.: 3D model a fotografie zkonstruovaného přípravku

Příloha IV.: Výrobní výkresy a sestava přípravku

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. O právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Liberci, dne 25. května 2007

.....

Roman Balda

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act. No. 121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, Schoul Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or garant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL, of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

In Liberec, 25. May 2007

.....

Roman Balda

